

## Совершенствование методики оценки вероятности пробоя стенок конструкции космических аппаратов

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

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

<sup>2</sup> АО «НПО Лавочкина», г. Химки, Московская обл., 141402, Россия

*Предложены способы совершенствования методики оценки вероятности пробоя стенок конструкции космических аппаратов в результате воздействия метеорно-техногенных частиц. В настоящее время эта задача решена с помощью разработанной авторами статьи методики, использующей сопряжение моделей распределения высокоскоростных частиц (микрометеоритов и космического мусора) в космическом пространстве с баллистическими уравнениями, определяющими стойкость конструкции к высокоскоростным воздействиям. Большие объемы исходных данных моделей приводят к значительным затратам вычислительного времени. Эта проблема решается путем совершенствования алгоритмов взаимодействия между выходными данными моделей распределения частиц и блоком, ответственным за решение баллистических уравнений. Точность получаемой оценки можно повысить, усовершенствовав методику расчета условной вероятности пробоя стенки.*

**Ключевые слова:** баллистические уравнения, вероятность пробоя, космический аппарат, космический мусор, метеорно-техногенные воздействия, элементы конструкции

**Введение.** Столкновения с метеорно-техногенными частицами в зависимости от их размеров, количества, скорости и плотности, а также места удара способны вызвать следующие повреждения космических аппаратов (КА):

- пробой герметизирующей оболочки корпуса и повреждение отдельных элементов конструкции, агрегатов и систем;
- эрозию внешних поверхностей с определенными радиационными характеристиками, солнечных батарей, оптических приборов и других устройств и деталей, размещенных снаружи КА, а также ухудшение их рабочих характеристик;
- откалывание частиц от внутренней поверхности оболочки корпуса, что может быть источником опасности для аппаратуры и экипажа пилотируемых КА.

Оценить вероятность пробоя стенок конструкции КА в результате метеорно-техногенных воздействий можно на этапе проектирования КА. На нем проводится анализ интенсивности потоков метеорных тел и космического мусора (КМ), основанный на применении моделей распределения метеорных и техногенных частиц в космиче-

ском пространстве, в совокупности с использованием баллистических уравнений для расчетных элементов, определяющих зависимость критического размера частиц от характеристик соударения.

Для решения этой задачи необходимо иметь данные о стойкости элементов конструкции КА к воздействию высокоскоростных частиц, а также учитывать влияние характеристик метеорно-техногенных тел на последствия столкновений. Обобщенные зависимости критического диаметра частиц от параметров конструкции стенки, величины и направления скорости столкновения  $v_0$ , а также удельного веса частиц [1] имеют вид:

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

Здесь  $d_c$  — критический диаметр ударника, который вызывает поражение конструкции на интересующей скорости воздействия (поражение конструкции определяется как перфорация задней стенки или потеря материала (отделение осколка) от задней поверхности задней стенки конструкции);  $t_b$  — толщина внешнего слоя защиты;  $S$  — расстояние между бампером и задней стенкой;  $t_w$  — толщина преграды;  $v_0$  — скорость столкновения;  $\theta$  — угол между вектором скорости частицы и нормалью к поверхности;  $\rho_p$  — удельный вес частицы;  $\rho_w$  — удельный вес материала стенки.

Таким образом, при решении рассматриваемой задачи должно быть учтено большое число факторов, от которых зависит вероятность пробоя стенок элементов конструкции КА. Например, в компьютерной программе SDPA-PP [2] для расчета вероятности пробоя стенок элементов конструкции КА частицами КМ используются выходная информация модели космического мусора SDPA [3, 4], а также реализованные в виде стандартной процедуры баллистические предельные зависимости. Совершенствовать методику расчета в таких программах необходимо, поскольку расчет вероятности пробоя стенок — очень трудоемкая задача, требующая значительного количества машинного времени. По этой причине представляется актуальным оптимизировать информационный обмен между модулями расчета характеристик потока КМ относительно КА и расчета вероятности пробоя стенок [5].

В настоящей статье рассмотрена модификация авторской методики оценки вероятности пробоя, при которой в качестве исходных характеристик используются данные модели пространственного распределения метеорного вещества (см. ГОСТ 25645.128–85 «Вещество метеорное. Модель пространственного распределения») и космического мусора (см. ГОСТ Р 25645.167–2005 «Космическая среда (есте-

ственная и искусственная). Модель пространственно-временного распределения плотности потоков техногенного вещества в космическом пространстве»). Основы реализации пространственной модели для расчета исходных характеристик, воздействующих на рассматриваемый элемент КА метеорных тел, изложены в работе [6]. Эта методика основана на применении сферической тригонометрии для расчета метеорных потоков, заданных таблицами двумерного распределения плотности радиантов спорадических метеорных тел относительно движущегося КА. Данная методика актуальна и востребована благодаря комплексному подходу к расчету воздействия метеорных частиц и КМ в совокупности на элементы КА.

**Оптимизация информационного обмена между модулями.** Характеристики частиц КМ можно определить по методике, изложенной в работах [3, 4], с использованием статистических таблиц распределения направлений и скоростей частиц из ГОСТ Р 25645.167–2005. Причем для КМ добавлены дополнительные диапазоны размеров космических объектов для проведения расчетов, направленных именно на определение вероятности пробоя стенок конструкции КА [7].

Важная составляющая модификации методики расчета — оптимизация информационного обмена между модулями расчета характеристик подлетающих частиц и расчета критического диаметра  $d_c$  пробивающей стенку частицы при заданных условиях. Для расчета параметров пробоя двойной стенки использованы формулы, имеющие значительное количество входных данных, которые многократно применялись в расчетах значений  $d_c$  при использовании массивов статистических данных распределения направлений подлета частиц и их скоростей. Весьма эффективным для ускорения решения оказался предварительный расчет в программе значений  $d_c$  при всех возможных значениях скоростей столкновения и углов подлета для заданной стенки с занесением результатов в массив данных. Например, расчет для элемента типа площадки в конфигурации двойной стенки по формулам работы [8] после использования модификации занял в 3,5 раза меньше времени, чем последовательное применение этих формул при обходе массивов статистических данных в каждой возникающей ситуации. Усложнение расчетных элементов, а также использование модифицированных формул для расчета двойной стенки [9] обеспечивают более существенную экономию.

**Совершенствование методики расчета вероятности пробоя.** Вторая часть модификации заключалась в совершенствовании методики расчета условной вероятности пробоя стенки (при условии, что столкновение произошло).

В монографии [5] задача оценки вероятности пробоя рассмотрена через поток на элементарную площадку  $dF$  на поверхности КА, ори-

ентированную относительно системы координат  $XYZ$ . Здесь ось  $X$  направлена по тангенциальной составляющей вектора скорости КА; ось  $Y$  — по радиусу-вектору; ось  $Z$  — по бинормали;  $dQ(A)$  — плотность потока частиц в азимутальном секторе  $(A, A + dA)$  (рис. 1).

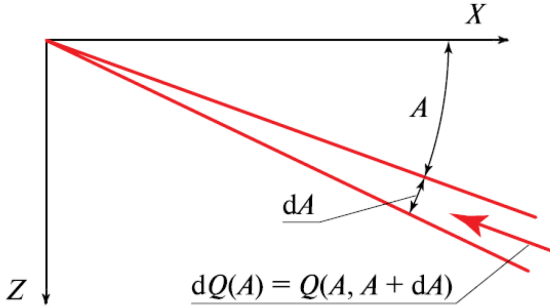


Рис. 1. Плотность потока частиц в секторе

Как известно, пробой происходит при выполнении двух условий:

- произошло столкновение данного элемента конструкции КА с частицей;
- размер частицы  $d$  превышает величину  $d_c$ , рассчитанную для конкретных условий данного столкновения ( $d > d_c$ ).

Вероятность пробоя стенки частицами заданного диапазона размеров  $P_{\text{проб}}(d_j, d_{j+1})$  равна произведению вероятности столкновения  $P_{\text{col}}(d)$  на условную вероятность пробоя стенки (при столкновении):

$$P_{\text{проб}}(d_j, d_{j+1}) = P_{\text{col}}(d_j, d_{j+1}) P(d_c < d_{\text{col}})_j. \quad (2)$$

Вероятность столкновения площадки на некотором интервале времени с частицами заданного размера

$$P_{\text{col}}(d_j, d_{j+1}) = Q(d_j, d_{j+1}) \Delta t \cos \theta dF, \quad (3)$$

где  $\theta$  — угол между направлением потока  $dQ$  и нормалью к элементарной площадке.

При расчете условной вероятности пробоя  $P_{\text{проб}}(d_c < d_{\text{col}})_j$  следует учитывать данные о конструкции стенки, значения угла  $\theta_i$  и относительной скорости  $V_m$ , а также зависимость плотности потока частиц от их размеров. Кроме того, применяются дискретная сетка возможных значений удельного веса частиц  $\rho_k$  и соответствующее распределение  $p(\rho_k)_j$ . Данная информация позволяет обратиться к

формуле (1) и рассчитать значение  $d_c$ . Последующий расчет зависит от того, попала ли оценка  $d_c$  в рассматриваемый диапазон размеров частиц ( $d_j, d_{j+1}$ ):

$$P(d_c < d_{col})_{j,m,i,k} = \begin{cases} 0 & \text{при } d_c > d_{j+1}, \\ \frac{Q(>d_c) - Q(>d_{j+1})}{Q(>d_j) - Q(>d_{j+1})} & \text{при } d_j < d_c < d_{j+1}, \\ 1 & \text{при } d_c < d_j. \end{cases} \quad (4)$$

На рис. 2 показана связь оценок  $Q(>d_c)$  с модельными оценками  $Q(>d_j)$  и  $Q(>d_{j+1})$ .

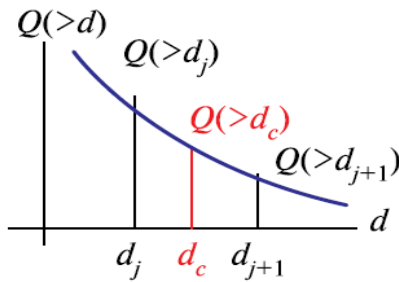


Рис. 2. Функция плотности потока частиц

Значение потока частиц  $Q(>d_c)$  размером более  $d_c$  можно определить с помощью интерполяции. Затем оценки (2) суммируются с учетом доли  $p(\rho_k)_j$  частиц, имеющих удельный вес  $\rho_k$ . В результате можно определить искомую условную вероятность пробоя рассматриваемого участка стенки КА  $dF$ :

$$P(d_c < d_{col})_j = \sum_m \sum_i \sum_k P(d_c < d_{col})_{j,m,i,k} p(V_m, \cos \theta_i) p(\rho_k)_j. \quad (5)$$

Таким образом, подстановка оценок (3) и (5) в равенство (2) приводит к определению вероятности пробоя участка стенки КА  $dF$  в рассматриваемых условиях.

Приведенная методика была применена к метеорной модели. Согласно ГОСТ 25645.128–85 в геоцентрической системе координат плотность потока спорадических метеорных тел  $N(m)$  массой  $m > 10^{-6}$  г на удалении до  $\sim 1\,000\,000$  км от поверхности Земли можно вычислить по формуле

$$\lg N(m) = -13,4 - 1,2 \lg m, \quad (6)$$

а плотность потока метеорных тел массой  $m \leq 10^{-6}$  г на удалении 200...1000 км от поверхности Земли по формуле

$$\lg N(m) = -11,8 - 0,9 \lg m. \quad (7)$$

Таким образом, определение плотности потока  $Q(> d_c)$  частиц размером более  $d_c$  не представляет сложности: переводя массы частиц в диаметры, в формуле (4) можно напрямую применить соотношение, действующее при  $d_j < d_c < d_{j+1}$  для всех диапазонов масс частиц, рассматриваемых в ГОСТ 25645.128–85.

По сравнению с исходным вариантом, когда в формуле (4) при  $d_j < d_c < d_{j+1}$  значение  $P(d_c < d_{col})_j$  принималось равным нулю, указанная методика позволяет уточнить результат на 2...3 %. Для составляющей КМ применялся несколько видоизмененный вариант. Поскольку плотность потока для объектов различных диапазонов размеров является табличным значением ГОСТ Р 25645.167–2005, каждый диапазон диаметров ( $d_j, d_{j+1}$ ) был разбит на  $n$  более мелких интервалов с равномерным шагом по диаметру и значения  $Q(> d_{j,l})$ , где  $l \in (1, \dots, n)$ , были заранее рассчитаны и внесены в исходные данные программы, что не противоречит методике расчета, изложенной в монографии [5]. Указанными приемами достигаются высокая точность и скорость проведения оценочного расчета вероятности пробоя стенок конструкции КА при учете в совокупности всех воздействующих факторов: спорадических метеорных частиц, частиц, принадлежащих пылевой оболочке Земли, частиц, принадлежащих сезонным метеорным потокам, и частиц КМ.

**Решение тестовой задачи.** В некоторых публикациях представлены примеры тестовых расчетов потока частиц относительно объекта и вероятности пробоя. В гл. 2 руководства по метеорной защите [10] приведен подробный пример, в котором даны оценки вероятности столкновений (потока относительно объекта) и пробоя стенок кубика (как одиночной, так и двойной стенки), движущегося по круговой орбите МКС. Имеется в виду обычный куб с длиной стороны 1 м, ориентация граней которого показана на рис. 3.

Баллистические характеристики:

Высота, км .....	400
Наклонение, град .....	51,6
Запуск, год .....	2002
Продолжительность, годы .....	1

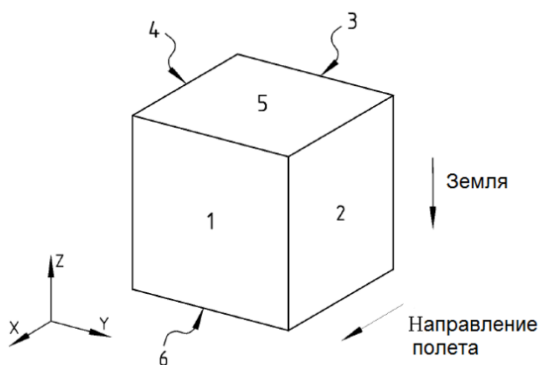


Рис. 3. Ориентация граней куба

Для проверки были использованы модели КМ NASA Debris'91 [11] и NASA Debris'96 (ORDEM96) [12].

Плотность стенок КМ, используемая в указанных моделях, составляла  $2,8 \text{ г/см}^3$ .

Стенки куба характеризуются следующими характеристиками:

- 1) «одиночная» (рассчитывается количество пробоев в одиночной стенке толщиной 1 мм);
- 2) «двойная» (рассчитывается количество пробоев в двустенной структуре, т. е. толщина бампера (передней стенки) 2 мм, толщина задней стенки 4 мм, интервал между ними 10 см).

Указанные в тесте свойства материала Al 6061-T6, использованного в качестве одиночной стенки и переднего бампера в структуре двойной стенки:

Твердость по Бринеллю, кгс/мм <sup>2</sup> .....	95
Плотность, г/см <sup>3</sup> .....	2,713
Скорость звука в материале, км/с .....	5,1

Материал задней стенки в структуре двойной стенки Al 2024-T3 обладает пределом текучести  $\sigma_T = 47 \text{ ksi}$ . Отечественным аналогом материала является сплав Д16.

В расчетах использованы баллистические уравнения для конструкций с одной стенкой и защиты Уиппла (двойная стенка), приведенные в работы [8].

В табл. 1 представлены результаты сравнения потоков частиц КМ на грань куба площадью  $1 \text{ м}^2$  в год ( $\text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$ ), рассчитанных по программе на основе авторской методики, с данными указанных американских моделей и с аналогичным тестовым расчетом по программе SDPA-PP [5].

## Оценка числа столкновений с КМ (для куба)

Исходные данные		Грани куба						Всего
Модель	Тест	1	2	3	4	5	6	
NASA Debris'91	$d > 0,1$ мм	2,327E+00	1,073E+00	0,000E+00	1,073E+00	0,000E+00	0,000E+00	4,473E+00
	$d > 1,0$ см	2,966E-05	1,368E-05	0,000E+00	1,368E-05	0,000E+00	0,000E+00	5,702E-05
NASA Debris'96	$d > 0,1$ мм	4,384E+00	2,480E+00	7,164E-02	2,480E+00	6,624E-02	6,704E-02	9,549E+00
	$d > 1,0$ см	4,283E-06	3,977E-06	2,764E-07	3,977E-06	2,273E-07	2,273E-07	1,297E-05
SDPA-PP	$d > 0,1$ мм	—	—	—	—	—	—	—
	$d > 1,0$ см	7,410E-06	3,740E-06	0,000E+00	3,720E-06	0,000E+00	0,000E+00	1,487E-05
Авторская программа	$d > 0,1$ мм	2,929E+00	1,261E+00	5,893E-03	1,261E+00	0,000E+00	0,000E+00	5,457E+00
	$d > 1,0$ см	1,004E-05	4,319E-06	2,019E-08	4,319E-06	0,000E+00	0,000E+00	1,870E-05

По данным табл. 1 полученная на основе авторской методики оценка числа столкновений по потокам частиц КМ диаметром  $d > 1$  см сходна с оценками по программам SDPA-PP (что естественно ввиду общности исходных данных) и NASA Debris'96. Оценка потока более мелких частиц находится между оценками двух американских программ (что является удовлетворительным результатом).

Для сравнения оценки вероятности пробоя граней куба за один год приведены в табл. 2.

Таблица 2

## Оценка вероятности пробоя граней куба

Исходные данные		Грани куба						Всего
Модель	Конструкция	1	2	3	4	5	6	
NASA Debris'91	с 1 стенкой	1,987E-01	5,074E-02	0,000E+00	5,074E-02	0,000E+00	0,000E+00	2,779E-01
	с 2 стенками	1,198E-04	4,178E-05	0,000E+00	4,178E-05	0,000E+00	0,000E+00	2,034E-04
NASA Debris'96	с 1 стенкой	2,126E-01	7,681E-02	5,221E-04	7,681E-02	1,238E-03	1,243E-03	3,310E-01
	с 2 стенками	1,404E-05	1,644E-05	4,571E-07	1,644E-05	4,343E-07	4,366E-07	4,825E-05
SDPA-PP	с 1 стенкой	—	—	—	—	—	—	—
	с 2 стенками	2,100E-05	1,000E-05	0,000E+00	1,000E-05	0,000E+00	0,000E+00	4,100E-05
Авторская программа	с 1 стенкой	1,453E-01	5,177E-02	2,300E-05	5,177E-02	0,000E+00	0,000E+00	2,315E-01
	с 2 стенками	2,400E-05	6,000E-06	0,000E+00	6,000E-06	0,000E+00	0,000E+00	3,600E-05

Тестовое сравнение оценок вероятности пробоя граней куба показывает наибольшую близость результатов авторской программы к результатам программы SDPA-PP.

Точность прогноза вероятности повреждения существенно зависит от точности моделей распределения метеорно-техногенных тел и баллистических уравнений — формул, используемых для определения ситуации повреждения. Последние должны опираться на статистику тестов высокоскоростных воздействий, и их можно подобрать для различных моделей защитных конструкций.

**Заключение.** Проведена работа по совершенствованию предложенной методики оценки вероятности пробоя стенок КА при воздействии метеорно-техногенных частиц. Представлены результаты оптимизации алгоритма взаимодействия между выходными данными моделей пространственного распределения частиц и модулем расчета



критического диаметра пробивающих частиц, а также совершенствования алгоритма расчета условной вероятности пробоя стенки конструкции. Приведенные результаты тестового сравнения оценок потоков частиц на грани условного куба, рассчитанных по данной методике и наиболее известным моделям распределения КМ, а также сравнения вероятности пробоя типовых конструкций, применяемых при проектировании КА, показали близость предложенной методики к отечественной модели распределения КМ SDPA. Приведены основные составляющие успешного решения задачи оценки вероятности пробоя.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Николаевский В.Н., ред. *Высокоскоростные ударные явления*. Москва, Мир, 1973, 528 с.
- [2] Nazarenko A.I., Koverga E.V. Optimization of the interface between space debris environment models and damage prediction tools. *Proceedings of the Fourth European Conference on Space Debris, 18–20 April 2005*, ESA/ESOC, Darmstadt, Germany, ESA Publications Division Publ., 2005, pp. 613–618.
- [3] Назаренко А.И. *Экологические проблемы и риски воздействий ракетно-космической техники на окружающую среду*. В.В. Адушкин, С.И. Козлов, А.В. Петров, ред. Москва, Анкил, 2000, с. 382–432.
- [4] Nazarenko A.I., Sokolov V.G., Gorbenko A.V. The comparative analysis of the probability of spacecraft pressure wall penetration for different space debris environment models. *Proceedings of the Third European Conference on Space Debris, 19–21 March 2001*. European Space Operations Centre (ESOC), Darmstadt, Germany, 2001, pp. 667–672.
- [5] Назаренко А.И. *Моделирование космического мусора*. Москва, ИКИ РАН, 2013, 216 с.
- [6] Добрица Д.Б. О методике расчета метеорных потоков на элементы КА. *Сб. науч. тр. НПО им. С.А. Лавочкина*, 2009, вып. 8, с. 215–228.
- [7] Добрица Д.Б. К вопросу расчета стойкости элементов конструкции космического аппарата при воздействии частиц космического мусора. *Вестник НПО им. С.А. Лавочкина*, 2012, № 5 (16), с. 53–59.
- [8] Christiansen E.L. Design and performance equations for advanced meteoroid and debris shields. *International Journal of Impact Engineering*, 1993, vol. 14, pp. 145–156.
- [9] Добрица Б.Т., Добрица Д.Б. Моделирование баллистической стойкости двойной стенки космических аппаратов при высокоскоростном соударении. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2016, вып. 11.  
URL: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2016-11-1554> (дата обращения 15.03.2017).
- [10] *Inter-Agency Space Debris Coordination Committee. Protection manual*. IADC-04-03. Version 3.3. Revision April 04, 2004. 228 p.  
URL: [http://www.iadc-online.org/Documents/IADC-04-03\\_Protection\\_Manual\\_v7.pdf](http://www.iadc-online.org/Documents/IADC-04-03_Protection_Manual_v7.pdf) (accessed March 15, 2017).
- [11] *NASA SSP 30425, Rev. B, Space Station Program Natural Environment Definition for Design*, 1994. URL: [http://everyspec.com/NASA/NASA-JSC/NASA-SSP-PUBS/SSP-30425B\\_29660](http://everyspec.com/NASA/NASA-JSC/NASA-SSP-PUBS/SSP-30425B_29660) (accessed March 15, 2017).

- [12] Kessler D.J., Zhang J., Matney M.J., Eichler P., Reynolds R.C., Anz-Meador P.D., Stansbery E.G. *A computer based orbital debris environment model for spacecraft design and observations in low earth orbit*. NASA TM-104825, 01.11.1996, pp. 55.

Статья поступила в редакцию 28.03.2017

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Добрица Б.Т., Добрица Д.Б., Яценко Б.Ю. Совершенствование методики оценки вероятности пробоя стенок конструкции космических аппаратов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2017, вып. 7.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2017-7-1633>

**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 АО «НПО Лавочкина». Автор более 30 научных публикаций в области проблематики защиты космических аппаратов от метеорно-техногенных воздействий.

e-mail: dobrica@laspace.ru

**Яценко Богдан Юрьевич** — канд. техн. наук, ведущий специалист АО «НПО Лавочкина». Автор более 30 научных публикаций в области теплового излучения и систем регистрации метеорно-техногенных воздействий.

e-mail: kom501@laspace.ru

## Improvement of methods for evaluating the spacecraft pressure wall penetration probability

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

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

<sup>2</sup> Lavochkin Science and Production Association,  
Khimki, Moscow region, 141402, Russia

*The article suggests the ways to improve the methods for evaluating the probability of the spacecraft pressure wall penetration caused by meteoroids and space debris impacts. The problem of evaluating the penetration probability is viewed in the form of ballistic equations, which define the structure resistibility to high velocity impacts in relation to the outlet data of spatial distribution models of hypervelocity particles (micrometeorites and space debris) in space. Currently this problem is solved with the help of proprietary technology which uses the conjunction of distribution particles models with ballistic equations. It takes a lot of time to calculate large amounts of the models initial data. However, this problem can be solved by the enhancement of algorithms of interaction between the output data of distribution particles models and the unit responsible for the solutions of ballistic equations. The accuracy of the evaluation obtained is increased due to the improvement of calculation methods for conditional probability of the pressure wall penetration.*

**Keywords:** ballistic equations, probability of penetration, spacecraft, space debris, meteoroids and space debris impacts, structure elements

### REFERENCES

- [1] Nikolaevsky V.N., ed. *Vysokoskorostnye udarnye yavleniya* [High-Velocity impact phenomena]. Moscow, Mir Publ., 1973, 528 p.
- [2] Nazarenko A.I., Kovrega E.V. Optimization of the Interface between Space Debris Environment Models and Damage Protection Tools. *Proceedings of the Fourth European Conference on Space Debris, 18–20 April 2005*, ESA/ESOC, Darmstadt, Germany, 2005, pp. 613–619.
- [3] Adushkin V.V., Kozlov S.I., Petrov A.V., ed. Problema “kosmicheskogo musora” v okolozemnom prostranstve [The problem of “space debris” in the terrestrial space]. *Ekologicheskie problemy i riski vozdeystviy raketno-kosmicheskoy tekhniki na okruzhayushchuyu prirodnyuyu sredu* [Ecological problems and risks of space technology impact on the environment]. Moscow, Ankil Publ., 2000, pp. 382–432.
- [4] Nazarenko A.I., Sokolov V.G., Gorbenko A.V. The comparative analysis of the probability of spacecraft pressure wall penetration for different space debris environment models. *Proceedings of the Third European Conference on Space Debris, 19–21 March 2001*, European Space Operations Centre (ESOC), Darmstadt, Germany, 2001, pp. 667–672.
- [5] Nazarenko A.I. *Modelirovanie kosmicheskogo musora* [Space debris modeling]. Seri. Mekhanika, upravlenie i informatika [Ser. Mechanics, Control and Informatics]. Moscow, IKI RAN Publ., 2013, 216 p.
- [6] Dobritsa D.B. O metodike rascheta meteornykh potokov na elementy KA [About the methods of calculating the meteor streams directed against the spacecraft elements]. *Sbornik nauchnykh trudov NPO im. S.A. Lavochkina*

- [Lavochkin Science and Production Association collection. Collected Scientific Papers]. Moscow, 2009, iss. 8, pp. 215–228.
- [7] Dobritsa D.B. *Vestnik NPO im. S.A. Lavochkina*, 2012, no. 5, pp. 53–59.
- [8] Christiansen E.L. *International Journal of Impact Engineering*, 1993, vol. 14, pp. 145–156.
- [9] Dobritsa B.T., Dobritsa D.B. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2016, iss. 11. Available at: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2016-11-1554>
- [10] *Inter-Agency space debris coordination committee. Protection manual*. IADC-04-03. Version 3.3. Revision April 04, 2004, 228 p. Available at: [http://www.iadc-online.org/Documents/IADC-04-03\\_Protection\\_Manual\\_v7.pdf](http://www.iadc-online.org/Documents/IADC-04-03_Protection_Manual_v7.pdf) (accessed March 15, 2017).
- [11] *NASA SSP 30425, Rev. B, Space Station Program Natural Environment Definition for Design, 1994*. Available at: [http://everyspec.com/NASA/NASA-JSC/NASA-SSP-PUBS/SSP-30425B\\_29660](http://everyspec.com/NASA/NASA-JSC/NASA-SSP-PUBS/SSP-30425B_29660) (accessed March 15, 2017).
- [12] Kessler D.J., Zhang J., Matney M.J., Eichler P., Reynolds R.C., Anz-Meador P.D., Stansbery E.G. *A computer based orbital debris environment model for spacecraft design and observations in low earth orbit*. NASA TM 104825, 01.11.1996, p. 55.

**Dobritsa B.T.**, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Computational Mathematics and Mathematical Physics, Bauman Moscow State Technical University. Author of over 30 scientific publications in mathematics. e-mail: [fs11@bmtu.ru](mailto:fs11@bmtu.ru)

**Dobritsa D.B.**, Cand. Sc. (Eng.), Leading mathematician of Lavochkin Research and Production Association. Author of over 30 scientific publications on the problems of spacecraft protection from meteoroids and space debris impacts. e-mail: [dobrica@laspace.ru](mailto:dobrica@laspace.ru)

**Yaschenko B.Y.**, Cand. Sc. (Eng.), Leading specialist of Lavochkin Research and Production Association. Author of over 30 scientific publications in the field of thermal emission and systems for detecting meteoroids and space debris impacts. e-mail: [kom501@laspace.ru](mailto:kom501@laspace.ru)