

УДК 539.3

А.В. Герасимов, С.В. Пашков, Ю.Ф. Христенко**ЗАЩИТА КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ
ОТ ТЕХНОГЕННЫХ И ЕСТЕСТВЕННЫХ ОСКОЛКОВ.
ЭКСПЕРИМЕНТ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ¹**

Проблема защиты космических аппаратов приобретает большое значение в связи с увеличивающейся продолжительностью полетов и возрастанием вероятности столкновения их с естественными и техногенными осколками. Проведенное численное моделирование и экспериментальное определение предельной стойкости элементов конструкции КА «Спектр-УФ» использовалось при отработке противометеоритной защиты космических аппаратов, а также защиты от космического мусора.

Ключевые слова: численное моделирование, высокоскоростное соударение, космический аппарат, разрушение, легкогазовые установки.

Интенсивное освоение человечеством околоземного космического пространства имеет кроме несомненных достоинств и свои теневые стороны. Присутствие в сформированном приземном слое (протяженностью от 300 до 2000 километров) огромного количества техногенных осколков различных размеров, 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. Угрозу представляют также и метеорные частицы естественного происхождения, приходящие из дальнего космоса. Значительное время полета космических аппаратов повышает для них вероятность столкновения с осколками. В работе [1] еще в 1947 г. был предложен способ защиты космических аппаратов от удара высокоскоростных космических частиц, заключающийся в том, что перед защищаемой стенкой устанавливается тонкостенный экран для распределения импульса фрагментов ударника по большей площади стенки за счет разрушения ударника и последующего бокового разлета его фрагментов. Таким образом удастся достичь необходимой степени защиты в заданном диапазоне скоростей соударения без неприемлемого увеличения массы космического аппарата. Следует отметить, что проблема снижения массы защитных элементов КА при сохранении их эффективности по-прежнему остается актуальной. Для моделирования соударения высокоскоростных частиц с образцами защиты использовались в основном легкогазовые пушки, позволяющие разгонять ударники необходимых размеров до скоростей порядка 8 км/с. Не принижая значения экспериментальных исследований для отработки защитных устройств, отметим, что проведение массовых испытаний в широком диапазоне размеров и скоростей ударников, материалов, толщин и конструкций защитных экранов требует больших затрат материальных ресурсов. Поэтому применение к исследованию данной проблемы современных компьютеров и численных методов, позволяющих решать задачи высокоскоростного соударе-

¹ Работа выполнена при частичном финансировании по программе Минобрнауки РФ (проект РНП 2.1.2. 2509) и частичной поддержке грантов РФФИ №10-08-00633а и №09-08-00662а.

ния в трехмерной постановке с учетом фрагментации ударников и защитных элементов конструкции КА, представляется теоретически и практически важной задачей. Численное моделирование высокоскоростного взаимодействия твердых тел с рассмотренными защитными системами позволяет воспроизвести, с приемлемыми затратами, характерные особенности физических процессов, протекающих при столкновении, рассмотреть и выбрать оптимальные схемы экранов.

Учет фрагментации материала твердых тел при интенсивных динамических нагрузках 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, начальных структурных особенностей материала, а именно: наличие пор, включений, дислокаций и т.д.

В данной работе в лагранжевой 3D-постановке рассматривается процесс высокоскоростного взаимодействия слоистых и разнесенных пластин с высокоскоростными 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 Уилкина [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 [10].

Для исследования процессов высокоскоростного взаимодействия разработан, изготовлен, смонтирован и запущен в эксплуатацию экспериментальный стенд (рис. 1), включающий универсальную станину, на которой может быть установлена любая из имеющихся в НИИ ПММ метательных установок (Т-29, ППХ 23/8, ППХ 34/8, ППХ 34/23/8, ГДИ 50/23, ППН 23 и т.д.), и вакуумируемую камеру.



Рис 1. Общий вид стенда с ЛПП ППХ34/8

Стенд завязан на измерительный комплекс (ИК), имеющий 6 измерительных каналов с разрешающей способностью от 20 нс до 1 с и объемом памяти от 1 до 32 К на каждый канал (двухканальные цифровые запоминающие осциллографы С9-8, GWINSTEK GDS-806С и PCSU1000). Все осциллографы связаны с ПЭВМ, что позволяет проводить первичную обработку экспериментальной информации и ее архивирование. Стенд позволяет вести разнообразные исследования процессов высокоскоростного соударения при скоростях до 8 км/с и выше. Уникальность стенда состоит в том, что станина для метательной установки и вакуумируемая камера смонтированы на единой подвесной платформе. Это позволяет исключить негативное влияние выстрела на фундамент здания. При проведении экспериментов использовались пороховые пушки калибром 5,6 и 8 мм, легкогазовая пушка с

«тяжелым поршнем» МПХ23/8 калибром 8 мм (возможно использование ствола калибром 5,6 мм). Основу стенда составляет «классическая» легкогазовая пушка с «легким поршнем» ППХ34/8, которая включает следующие основные узлы и детали: пороховую камеру, камеру сжатия (поршневой ствол), конический переходник и баллистический ствол. В наших экспериментах необходимо было отделять поддон от метаемого элемента, что являлось достаточно сложной проблемой. Бы-



Рис. 2. Элементы системы отсечки поддона после выстрела

ла разработана и реализована схема «силового» разделения поддона и ударника (рис. 2). Для этого на оси выстрела за датчиком дульной скорости устанавливается многослойная преграда с отверстием, в 1,5 – 2 раза превышающим диаметр ударника. Исследовалось несколько вариантов многослойной преграды: 1) основание – пластина из дюралюминия Д16 толщиной 30 мм, стальная пластина толщиной 8 мм, резина толщиной 6 мм, свинец толщиной 6 мм; 2) сверху добавлена стальная пластина толщиной 6 мм. Эксперименты показали, что второй вариант является более приемлемым. Причем при скоростях свыше 2 км/с толщину стальной верхней пластины необходимо увеличить до 10 мм. Пластина-основание жестко скреплена со стволом с помощью четырёх кронштейнов из стального уголка, которые, в свою очередь, крепятся к двум стальным кольцам, одетым на ствол и закреплённым на нём четырьмя винтами М20×1,5. Слоёная преграда сталь – резина – свинец – сталь имеет возможность перемещаться по пластине-основанию с помощью двух микрометрических винтов для точного совмещения центра отверстия с осью выстрела.

Для точного обозначения оси выстрела разработана система лазерного прицеливания, включающая входной калибр с системой крепления и юстировки лазера и выходной калибр, который крепится на титановой трубке для установки его в дульный срез ствола через датчик дульной скорости (рис. 3 и 4). Во входном и выходном калибрах выполнено центральное отверстие диаметром 1 мм. Лазер юстируется таким образом, чтобы луч проходил через отверстия во входном и выходном калибрах, что позволяет точно совмещать отверстия в преграде с осью выстрела.

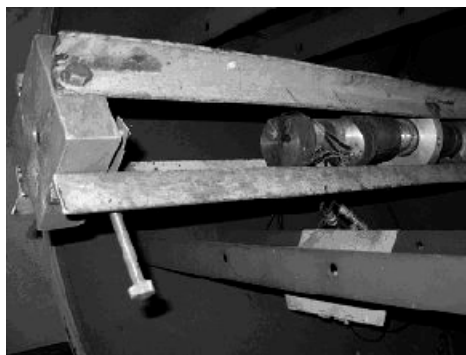


Рис. 3. Датчик скорости и система отсечки поддона



Рис. 4. Лазерная система прецизионного наведения

Для обеспечения измерения дульной скорости метаемой сборки электромагнитными датчиками использовались различные конструкции поддонов и крепления на них ферромагнитных маркеров. При использовании поддонов из поликарбоната калибром 5,6 мм к ним приклеивались шайбы из трансформаторного железа толщиной 0,2 мм, что обеспечивало уверенное измерение дульной скорости свыше 2 км/с. Однако при «силовом» разделении поддона и ударника осколки шайбы проникают в отверстие преграды и их воздействие на исследуемый образец может превышать воздействие ударника. Кроме этого, поликарбонат затекает в отверстие большим фрагментом и также повреждает исследуемый образец. Поэтому в дальнейших экспериментах использовались поддоны из текстолита средней прочности. Такой выбор обусловлен тем, что при ударе текстолит рассыпается на мелкие фрагменты, и их воздействие на образец существенно меньше воздействия ударника. В качестве маркера вначале использовался слой ферритового порошка, наклеенного на тыльный торец поддона. Однако при увеличении скорости метания (повышении давления на поддон) ферритовый маркер стал разрушаться. После этого ферритовый порошок клеивался в проточку на боковой поверхности поддона. При увеличении дульной скорости свыше 3 км/с сигнал от этого маркера не обеспечивал уверенного измерения дульной скорости, что потребовало изменения конструкции поддона и маркера. Для экспериментов со скоростями 3 – 4 км/с на переднем торце поддона делалась проточка и в нее клеивалась шайба из трансформаторного железа толщиной 0,2 мм с внутренним диаметром 6,5 мм и наружным – 7,5 мм. Такой маркер позволяет уверенно фиксировать дульную скорость в этом диапазоне.

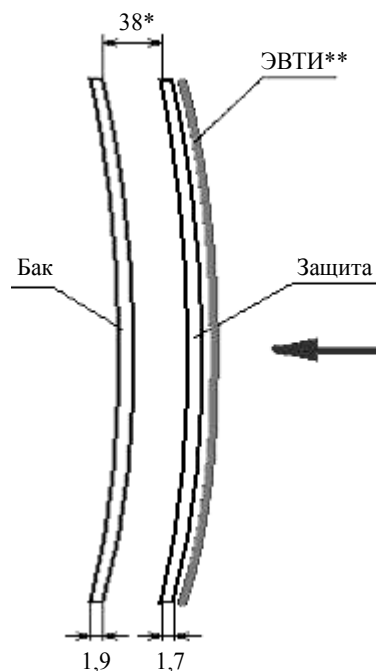


Рис. 5. Фрагмент бака с установленной противометеорной защитой

В экспериментах и при численном моделировании рассматривался образец, представляющий собой реальный фрагмент бака астрофизического спутника «Спектр-УФ» с установленной противометеорной защитой. Эксперименты проводились с алюминиевыми шариками диаметром 1,5 – 2,5 мм при скоростях соударения 2,03 – 3,95 км/с. Защитная пластина имела толщину 1,7 мм, стенка бака – 1,9 мм, расстояние между ними – 38 мм. Оба элемента образца – алюминиевые. При взаимодействии алюминиевых шариков с образцом защита во всех случаях была пробита, но стенка бака оказывалась не пробитой, хотя оставались вмятины размером от 0,3 до 0,6 мм. Это показывает эффективность защиты при заданных размерах частиц и в данном диапазоне скоростей. Данные параметры выбирались из имеющихся оценок вероятности соударения с космическим мусором.

На рис. 6 и 7 показаны лицевая и тыльная стороны образца бака с защитной пластиной.

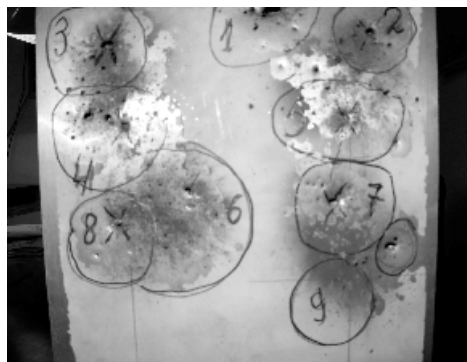


Рис. 6. Лицевая сторона образца бака с защитной пластиной

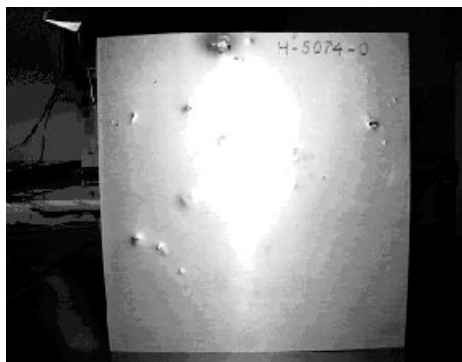


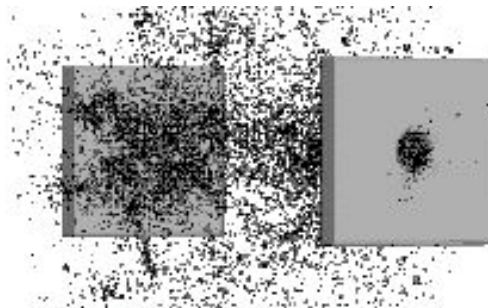
Рис. 7. Тыльная сторона образца бака с защитной пластиной

Отверстие на рис. 7 в верхнем правом углу получилось при соударении со стальным шариком диаметром 1,5 мм и скорости 2,11 км/с.

На рис. 8 приведены результаты сравнения экспериментальных данных и результатов численного расчета с учетом дробления материала ударника и преграды. Корпус – защита: Al – Al. Параметры системы: толщина пластин – 0,17 и 0,19 см; размер пластин 1,25 × 1,25 см; расстояние между пластинами – 3,8 см. Стальной ударник-шарик: радиус – 0,1 см, скорость – 2100 м/с.



a



б

Рис. 8 Соударение высокоскоростной частицы с элементами защиты и корпуса КА:
a – эксперимент; *б* – пространственная картина соударения

Сравнение результатов теоретического расчета и эксперимента показали, что в обоих случаях пробита защитная пластина и сформировался осколочный поток. Взаимодействие этого потока с элементом корпуса КА привело к образованию вмятины: 0,4 мм – эксперимент, 0,37 мм – расчет. После тестирования предложенной численной методики при низких скоростях соударения были проведены расчеты при более значительных скоростях взаимодействия ударников и преград.

На рис. 9 приведены результаты расчетов удара стального шарика диаметром 1,0 см со скоростью $V = 7000$ м/с по нормали к преграде, представляющей собой систему трех разнесенных алюминиевых пластин толщиной 0,3 см и размером 5 × 5 см. Расстояние между пластинами равняется 2 см. Показаны конфигурации системы преграда + ударник для двух моментов времени – 5,2 и 11,6 мкс.

К моменту времени 11,6 мкс полностью пробитыми оказались все три преграды. Скорость остатков стального шарика и первых трех преград еще достаточно велика ~ 4350 м/с. Картина разрушения преград и ударника характеризуется наличием осколков различных размеров с преобладанием самой мелкой фракции, что характерно для высокоскоростных соударений [9].

На рис. 9 отчетливо видно, что процесс деформирования и разрушения при нормальном ударе существенно трехмерный, несмотря на начальный осесимметричный характер нагружения преграды и ударника.

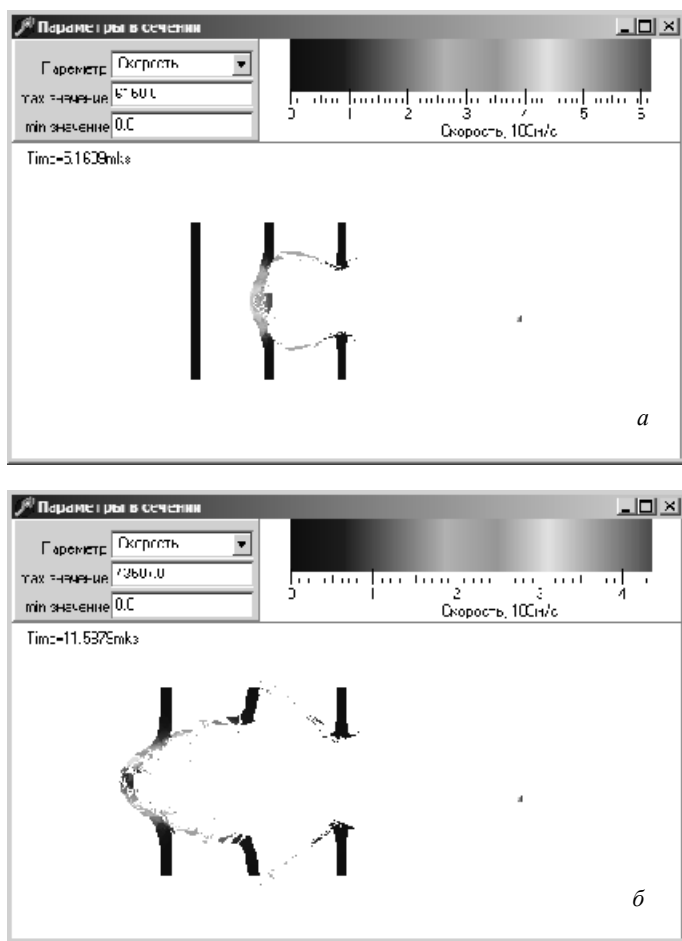


Рис. 9. Нормальное соударение стального шарика с разнесенной преградой, состоящей из трех алюминиевых пластин: а – 5,2 мкс; б – 11,6 мкс

На рис. 10 приведены результаты расчетов удара стального шарика диаметром 1,0 см со скоростью $V=7000$ м/с по нормали к преграде, представляющей собой систему пяти разнесенных стальных пластин толщиной 0,3 см и размером 5×5 см. Расстояние между пластинами равняется 2 см. Показаны конфигурации системы преграда + ударник для двух моментов времени – 30 и 74 мкс.

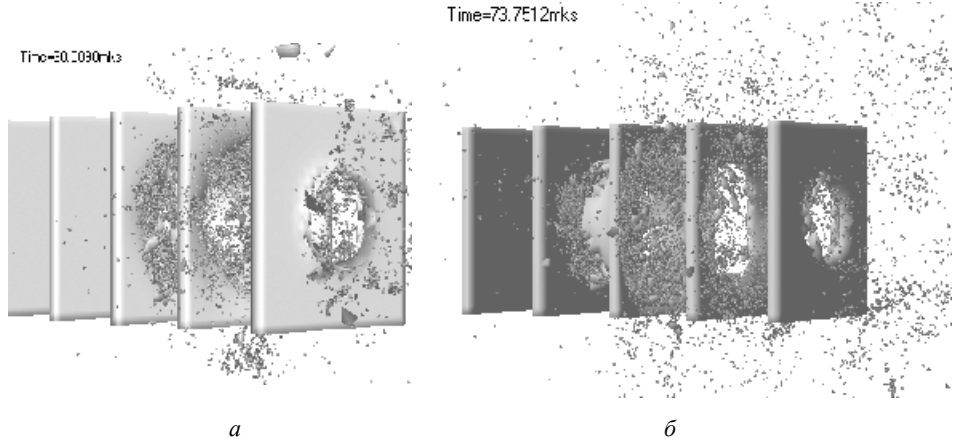


Рис. 10. Нормальное соударение стального шарика с разнесенной преградой, состоящей из пяти стальных пластин: *а* – 30 мкс; *б* – 74 мкс

К моменту времени 74 мкс полностью пробитыми оказались три первых преграды. Скорость остатков стального шарика и первых трех преград в ходе соударения их потока с четвертой преградой упала до нуля, преграда была деформирована, но не пробита. Картина разрушения преград и ударника характеризуется наличием осколков различных размеров с преобладанием самой мелкой фракции, что характерно для высокоскоростных соударений [9]. Расчет осколкообразования, в полном значении этого слова, стал возможен только при использовании подхода, предложенного в [10]. Подходы к разрушению, используемые в двумерных расчетах, дают систему колец, а не отдельные осколки, а неучет вероятностного характера распределения прочностных свойств материала конструкции приводит к полному разделению этих колец на отдельные ячейки в трехмерном случае. На рис. 10 отчетливо видно, что процесс деформирования и разрушения при нормальном ударе существенно трехмерный, несмотря на начальный осесимметричный характер нагружения преграды и ударника.

Следует отметить, что полученные результаты показывают возможность предложенного вероятностного подхода и лагранжевой численной методики в наиболее полной, с физической точки зрения, трехмерной постановке воспроизводить процессы пробития многослойных и разнесенных преград высокоскоростными элементами разрушенных конструкций и осколками космических тел и обосновать выбор наиболее эффективных защит космических аппаратов. Экспериментальные результаты подтвердили адекватность предложенной в данной работе численной методики. Проведенное численное исследование взаимодействия высокоскоростных частиц со слоисто-разнесенными преградами, используемыми для защиты КА, подтвердили эффективность рассмотренных конструкций защитных экранов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Whipple F.L.* Meteorites and space travel // *Astronomical Journal*. 1947. No. 1161. P. 131.
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. *Высокоскоростные ударные явления* / под ред. Р. Кинслоу. М.: Мир, 1973. 536 с.
10. *Теоретические и экспериментальные исследования высокоскоростного взаимодействия тел* / под ред. А.В. Герасимова. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2007. 572 с.

Статья поступила 13.05.2011 г.

Gerasimov A.V., Pashkov S.V., Khristenko Yu.F. SPACE VEHICLE PROTECTION FROM MAN-CAUSED AND NATURAL DEBRIS: EXPERIMENT AND NUMERICAL SIMULATION. The problem of protection of space vehicles acquires large importance in connection with increased duration of flights and increase of probability of their collision with natural and man-caused debris. The conducted numerical modeling and experimental determination of the limiting resistance of constructional elements of the Spectr-UF space vehicle was used for improvement of antimeteorite protection of space vehicles, as well as protection against space debris.

Keywords: numerical modeling, high-speed impact, space vehicle, destruction, light-gas gun.

GERASIMOV Alexander Vladimirovich (Tomsk State University)

E-mail: ger@niipmm.tsu.ru

PASHKOV Sergey Vladimirovich (Tomsk State University)

E-mail: ps@contek.ru

KHRISTENKO Jury Fedorovich (Tomsk State University)

E-mail: hrs@niipmm.tsu.ru