

БАЛЛИСТИЧЕСКИЕ ПРЕДЕЛЬНЫЕ УРАВНЕНИЯ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ОТ МИКРОМЕТЕОРОИДОВ И КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА

© 2016 г. Миронов В.В., Толкач М.А.

ГНЦ РФ–ФГУП «Исследовательский центр имени М.В. Келдыша» (Центр Келдыша)
Ул. Онежская, 8, г. Москва, Российская Федерация, 125438, e-mail: kerc@elnet.msk.ru

Задачи оценки риска повреждения космических аппаратов (КА) и выработки мероприятий по его снижению и созданию систем защиты от воздействия сверхскоростных частиц микрометеороидов (ММ) и частиц космического мусора (КМ) являются весьма актуальными. Риск повреждения КА зависит от свойств элементов конструкции и интенсивности потоков сверхскоростных частиц. Противостояние любого элемента конструкции КА воздействию удара сверхскоростной частицы, как известно, описывается баллистическими предельными уравнениями. В настоящей работе выполнен анализ возможности использования разработанных к настоящему времени баллистических предельных уравнений для проведения оптимизации одностеночной и многостеночной защит КА от ММ/КМ. Под оптимизацией подразумевается сравнение относительной эффективности различных материалов и конфигураций защиты от сверхскоростных частиц. Приведены общие требования к баллистическим предельным уравнениям, пригодным для проведения сравнительного анализа защиты от ММ/КМ. Предложены уравнения, наиболее полно учитывающие различные факторы при оценке защиты от сверхскоростных частиц ММ/КМ.

Ключевые слова: микрометеороид, космический мусор, баллистические предельные уравнения, защита космического корабля от микрометеороидов.

BALLISTIC LIMIT EQUATIONS TO OPTIMIZE THE SYSTEM FOR SPACECRAFT PROTECTION AGAINST MICROMETEOROIDS AND SPACE DEBRIS

Mironov V.V., Tolkach M.A.

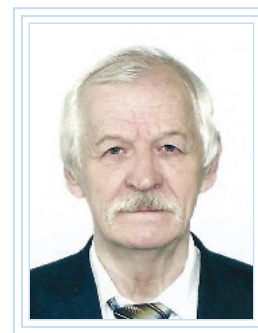
The State Scientific Centre of Russian Federation – Federal State Unitary Enterprise
Research Centre named after M.V. Keldysh (Keldysh Research Centre)
8 Onezhskaya str., Moscow, 125438, Russian Federation, e-mail: kerc@elnet.msk.ru

The tasks of evaluating the risk of damage and coming up with measures to mitigate it and develop a system for protecting spacecraft (SC) against exposure to high-velocity particles of micrometeoroids and space debris (MM/SD) are of crucial importance. The SC damage risk depends on the properties of structural elements and the rate of flow of high-velocity particles. The ability of any structural element of a SC to withstand an impact of a high-speed particle is known to be described by ballistic limit equations. This paper provides a feasibility analysis of using ballistic limit equations that had been developed to date in order to optimize single-wall and multiple-wall SC protection against MM/SD particles. What is meant by the optimization is a comparison of relative efficiency of different materials configurations of protection against high-speed particles. The paper provides general requirements for ballistic limit equations that are suitable for conducting a comparative analysis of protection against MM/SD. It proposes equations that take into account to the greatest extent possible the various factors involved in the assessment of protection against high-velocity MM/SD particles.

Key words: micrometeoroid, space debris, ballistic limits equations, micrometeoroid shield for spacecraft.



МИРОНОВ В.В.



ТОЛКАЧ М.А.

МИРОНОВ Вадим Всеволодович — доктор технических наук, профессор, начальник отделения Центра Келдыша, e-mail: kerc@elnet.msk.ru
 MIRONOV Vadim Vsevolodovich — Doctor of Science (Engineering), Professor, Head of Division at Keldysh Research Centre, e-mail: kerc@elnet.msk.ru

ТОЛКАЧ Михаил Александрович — кандидат технических наук, начальник группы 2 отделения Центра Келдыша, e-mail: m.tolkach02@mail.ru
 TOLKACH Mikhail Aleksandrovich — Candidate of Science (Engineering), Head of Group at 2nd Division of Keldysh Research Centre, e-mail: m.tolkach02@mail.ru

Введение

В околоземном космическом пространстве космические аппараты (КА) подвергаются ударам частиц микрометеороидов (ММ) и орбитального космического мусора (КМ). Поэтому решение задачи оценки риска повреждения и выработки мероприятий по его снижению и созданию систем защиты КА от воздействия сверхскоростных частиц ММ/КМ является весьма актуальным.

Риск повреждения КА зависит от интенсивности потоков высокоскоростных частиц ММ/КМ и свойств элементов конструкции КА. Риски оцениваются в зависимости от принятого *критерия повреждения*. Широко используемый критерий повреждения — полное проникновение («перфорация») защитной стенки. Используются и другие критерии повреждения, такие как:

- образование отверстия, превышающего заданный критический размер;
- глубина проникновения, которая превышает заданную глубину;
- образование кратера, по объему превышающего заданное значение и др. [1–4].

Известно (см., например, [3]), что вероятность того, что за время τ не случится ни одного «опасного» столкновения высокоскоростной частицы с уязвимой поверхностью ($n = 0$), определяется как вероятность непряма (ВНП) и вычисляется по формуле:

$$\text{ВНП} \equiv P_{n=0} = e^{-\bar{N}}.$$

Здесь, с учетом того, что для оперативных оценок удобно использовать ВНП одного

элемента уязвимой поверхности, величина \bar{N} определяется как:

$$\bar{N} = N_{\text{кр}} S_{\text{эл}} \tau,$$

где $N_{\text{кр}}$ — значение среднеинтегрального потока высокоскоростных частиц с критической массой $m_{\text{кр}}$ — предельным минимальным значением массы частицы ММ/КМ, при котором повреждается (в соответствии с принятым критерием) рассматриваемый элемент поверхности КА, $\text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$; $S_{\text{эл}}$ — рассматриваемая площадь уязвимого элемента поверхности КА, м^2 ; τ — время пребывания КА в ММ/КМ среде — время эксплуатации КА, год.

Риск R повреждения КА частицами ММ/КМ в этом случае оценивается как:

$$R = (1 - \text{ВНП}) \cdot 100 (\%).$$

Как видим, при заданной поверхности $S_{\text{эл}}$ и времени τ определяющим для ВНП является поток $N_{\text{кр}}$. Величина $N_{\text{кр}}$ зависит от критической массы $m_{\text{кр}}$ или, что то же самое, от критического диаметра $d_{\text{кр}}$ частиц ММ/КМ, наносящих ущерб защите КА. Полагается, что плотность материала частиц ММ/КМ известна. Величина $d_{\text{кр}}$, в свою очередь, определяется с помощью специально разрабатываемых *баллистических предельных уравнений* (БПУ). На рис. 1 представлена схема, используемая при определении требований к защите КА от ММ/КМ.

Здесь и далее понятия метеороид (микрометеороид) и космический мусор (техногенные высокоскоростные пылевые частицы) используются как принято в ГОСТ 25645.128-85

[5] (для ММ) и ГОСТ 25645.167-2005 [6] (для КМ). Соответствующие модели окружающей среды в части определения потока $N_{кр}$ для ММ/КМ также приведены в этих ГОСТ. Стандартов, регламентирующих использование БПУ при оценках ВПП, обнаружить не удалось. Кроме этого, в последние годы появилось множество работ, в основном зарубежных, с модификацией разработанных ранее БПУ. При модификации использовались результаты экспериментальных исследований и привлекались данные измерений, выполненных на возвращаемых элементах КА, космических станциях «Мир» и МКС, космическом телескопе *Hubble*, спутнике *LDEF (Long Duration Exposure Facility)* и др. [7–10]. В силу этого представляется целесообразным сформулировать требования и провести анализ БПУ с целью установления уравнений, пригодных для оптимизации (сравнительного анализа) защиты КА от ММ/КМ.

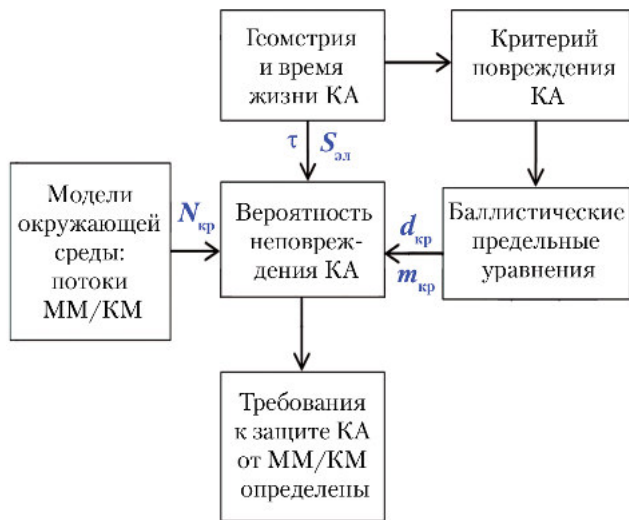


Рис. 1. Схема определения требований к защите КА от микрометеороидов и космического мусора (ММ/КМ)

Баллистические предельные уравнения эффективности и функция повреждения

В настоящее время БПУ представляют собой соотношения для определения либо минимального диаметра (минимальной массы) налетающей частицы, при которой происходит повреждение стенки, либо минимальной толщины стенки без повреждения при заданных скорости и диаметре (массе) налетающей частицы. Первый тип уравнений обычно называют *уравнениями эффективности*, а второй — *проектными уравнениями*. Уравнения взаимно конвертируемы.

Уравнения эффективности используются для расчета $d_{кр}$ (или $m_{кр}$) в зависимости от скорости ударяющей частицы ММ/КМ.

Проектные уравнения позволяют рассчитать как толщину передней стенки со стороны удара, так и минимальную толщину задней стенки без повреждения.

Стенку со стороны удара ММ/КМ принято называть *бампером*.

Отметим, что БПУ для многостеночной защиты (несколько стенок на расстоянии друг от друга с дополнительными слоями на поверхностях и между ними) записываются в виде БПУ для двустенной защиты (часто называемой защитой Уиппла), которая схематически показана на рис. 2.

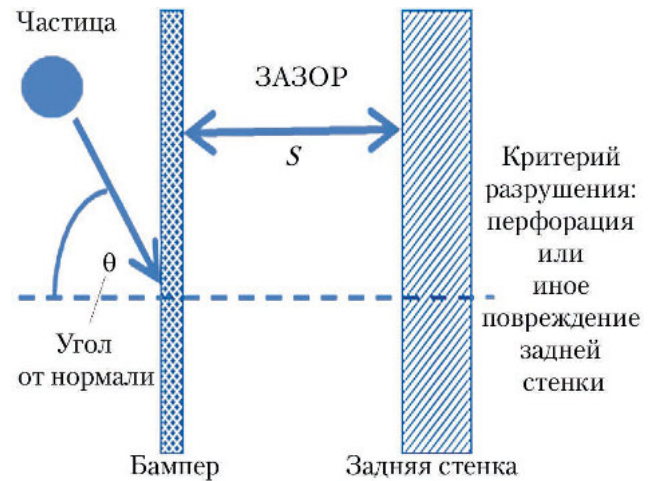


Рис. 2. Двустенная защита (защита Уиппла)

При определении ВПП с помощью БПУ эффективности строится функция повреждения — зависимость $d_{кр}$ от скорости удара v . Схематически функция повреждения показана на рис. 3.

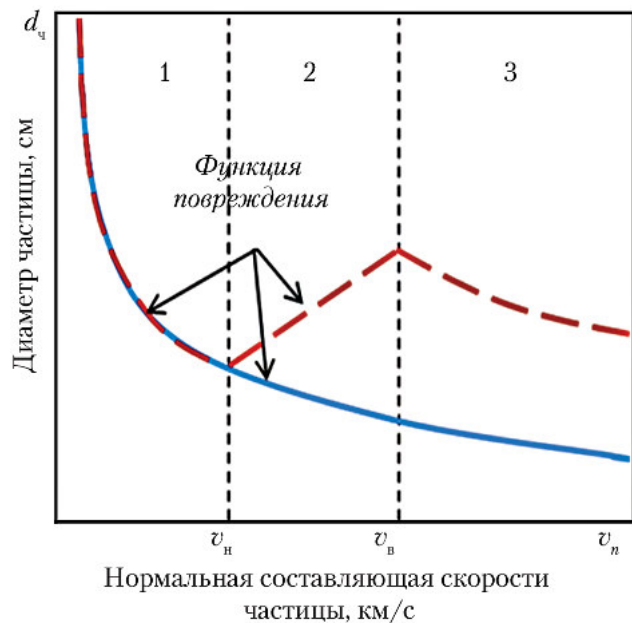


Рис. 3. Изменение функции повреждения с ростом скорости ударяющей частицы ММ/КМ [11, 12]: 1 — низкоскоростной режим; 2 — переходной режим; 3 — высокоскоростной режим; — — двойная стенка; — — одиночная стенка

Выше функции повреждения лежат значения диаметров d_c частиц ММ/КМ, наносящих повреждение, а ниже повреждение защиты (защищаемой стенки) отсутствует. Отметим, что низкоскоростной режим довольно часто называют баллистическим режимом.

Требования к баллистическим предельным уравнениям

Из анализа результатов расчетов и экспериментальных данных, выполненных многими авторами (см., например, [3, 4]), следует, что достоверность сравнительного анализа защиты от ММ/КМ по ВНП будет достигнута, если используемые при этом БПУ будут удовлетворять следующим требованиям:

- в БПУ должны быть включены все оптимизируемые переменные;
- диапазон изменения оптимизируемых переменных в БПУ должен быть достаточно широким.

Первое требование необходимо потому, что если переменная отсутствует в БПУ, то установить степень ее влияния на $d_{кр}$ и, соответственно, на ВНП, невозможно.

Второе требование связано с необходимостью обеспечения предельных переходов. Например, для БПУ одиночной стенки должна существовать возможность вычисления $d_{кр}$, когда толщина стенки приближается к нулю ($d_{кр}$ также стремится к нулю). Для двойной стенки (с бампером) БПУ должно конвертироваться в уравнение одиночной стенки при $S \rightarrow 0$ (см. рис. 2).

В силу того, что многостеночная защита при ее описании БПУ, как правило, сводится к защите Уиппла (бампера и задней стенки), перечень оптимизируемых параметров, присутствующих в уравнении, которые должны быть приняты во внимание, будет следующий:

- толщина бампера;
- толщина задней стенки;
- величина интервала-зазора (расстояние от бампера до задней стенки);
- характеристики материала задней стенки (на сегодняшний день это плотность и/или напряжение текучести);
- характеристики материала бампера (обычно это плотность);
- свойства материала ударяющей частицы (сейчас это размер/диаметр и плотность);
- скорость ударяющей частицы;
- угол соударения в отсчете от нормали к поверхности стенки (бампера).

Приведенный выше перечень параметров, которые должны быть включены в БПУ, не является окончательным. Например, делаются попытки учесть влияние формы ударяющей частицы, но пока для этого недостаточно экспериментальных данных [13].

Далее проанализируем известные БПУ, исходя из приведенных выше требований к ним. Рассмотрим случаи одно- и многостеночной защиты от ММ/КМ.

Баллистические предельные уравнения для одиночной стенки

При написании БПУ будем использовать обозначения согласно табл. 1.

Таблица 1

Условные обозначения в БПУ

Переменная	Обозначение	Размерность
Критический диаметр частицы*	$d_{кр}$	см
Диаметр частицы*	d_c	см
Толщина стенки	$l_{ст}$	см
Толщина бампера	$l_б$	см
Плотность материала частицы*	ρ_c	г/см ³
Плотность материала стенки	$\rho_{ст}$	г/см ³
Плотность материала бампера	$\rho_б$	г/см ³
Скорость частицы*	v	км·с ⁻¹
Нормальная составляющая скорости частицы*	v_n	км·с ⁻¹
Скорость звука в материале стенки	a	км·с ⁻¹
Твердость материала стенки по Бринеллю	H_B	МПа
Угол между вектором скорости частицы* и нормалью к поверхности	θ	°
Глубина кратера	h	см
Масса частицы*	m	г
Критическая масса частицы*	$m_{кр}$	г
Расстояние между бампером и задней стенкой	S	см
Напряжение текучести материала задней стенки	$\sigma_{ст}$	МПа (Н/мм ²)

Примечание. * — частица — это ударяющий метеороид или частица космического мусора.

Рассмотрим известные БПУ для одиночной стенки [1, 3, 14–19].

В работе [14] приведено соотношение для определения минимальной толщины стенки l_{\min} , при которой не возникает сквозного пробоа (повреждения). После конвертации этого уравнения в *БПУ эффективности* оно совпадает с уравнением из работы [18] при критерии повреждения $K_{\Pi} = 1,8$:

$$d_{\text{кр}} = \left[\frac{1}{5,24 K_{\Pi}} \frac{a^{2/3} H_B^{1/4} \rho_{\text{ст}}^{1/2} l_{\text{ст}}}{\rho_{\text{ч}}^{1/2} (v \cos \theta)^{2/3}} \right]^{18/19} = \left[0,106022 \left(\frac{\rho_{\text{ст}}}{\rho_{\text{ч}}} \right)^{1/2} \frac{a^{2/3} H_B^{1/4} l_{\text{ст}}}{(v \cos \theta)^{2/3}} \right]^{18/19}. \quad (1.1)$$

При перфорации $K_{\Pi} \leq 1,8$ [18]. Часто критерий повреждения задается также через условие образования кратера без осколков ($K_{\Pi} \geq 3$), дробления без выброса осколков ($2,2 \leq K_{\Pi} < 3$), дробления с выбросом осколков ($1,8 \leq K_{\Pi} < 2,2$) [1]. В общем случае величина K_{Π} зависит от свойств материала стенки.

Уравнение (1.1) из работы [18] получено для монолитного алюминиевого экрана. В работе [14] какие-либо указания на используемый материал в уравнении (1.1) отсутствуют.

В работе [18] приводится также уравнение для стенки из титана:

$$d_{\text{кр}} = \frac{K_{\Pi}}{5,24} \frac{a^{2/3} H_B^{1/4} \rho_{\text{ст}}^{1/2} l_{\text{ст}}}{\rho_{\text{ч}}^{1/2} (v \cos \theta)^{2/3}}. \quad (1.2)$$

Уравнение (1.2) содержит противоречие, связанное с физическим смыслом критерия повреждения K_{Π} . Чем K_{Π} меньше, тем больший урон наносит частица стенке, вплоть до ее перфорации, что следует из описания K_{Π} выше. При заданной скорости частицы это возможно только в том случае, когда с уменьшением K_{Π} размер (а значит и масса) частицы увеличивается. То есть зависимость $d_{\text{кр}}$ от K_{Π} должна быть обратно пропорциональной. В этом случае параметр повреждения K_{Π} должен стоять не в числителе (1.2), а в знаменателе, аналогично уравнению (1.1).

В работе [15], со ссылкой на справочник [16], для оценок $d_{\text{кр}}$ используется уравнение, представленное нами в более удобном виде:

$$d_{\text{кр}} = 0,244 \left(\frac{\rho_{\text{ст}}}{\rho_{\text{ч}}} \right)^{2/3} \frac{a^{2/3} l_{\text{ст}}}{(v \cos \theta)^{2/3}}. \quad (2)$$

Уравнение получено в предположении, что повреждение наступает при толщине преграды $l_{\text{ст}} = 1,8h$, где h — глубина кратера от удара частицы.

Авторами [17] предложено использовать соотношение, полученное экспериментальным

путем для типичных конструкционных материалов (сталь, алюминиевые сплавы, титан и др.). С целью удобства сопоставления с другими БПУ соотношение из работы [17] мы преобразовали к виду:

$$d_{\text{кр}} = 0,87 \left[\left(\frac{\rho_{\text{ст}}}{\rho_{\text{ч}}} \right)^{1/3} \frac{l_{\text{ст}}}{(v \cos \theta)^{2/3}} \right]. \quad (3.1)$$

В справочнике [18] для стенки из нержавеющей стали приводится несколько отличное от (3.1) БПУ. После приведения его к принятой нами форме и обозначениям мы получили:

$$d_{\text{кр}} = 1,57 \left[\left(\frac{\rho_{\text{ст}}}{\rho_{\text{ч}}} \right)^{1/2} \frac{l_{\text{ст}}}{(v \cos \theta)^{2/3}} \right]^{18/19}. \quad (3.2)$$

Для вычисления критического размера частицы в случае повреждения стенки из хрупких материалов (типа стекла), в [14] предлагается использовать соотношение для критического диаметра ММ/КМ, полученное в том же предположении, что и (2) — $l_{\text{ст}} = l_{\min} = 1,8h$:

$$d_{\text{кр}} = 0,93 \left[\left(\frac{\rho_{\text{ст}}}{\rho_{\text{ч}}} \right)^{1/2} \frac{l_{\text{ст}}}{(v \cos \theta)^{2/3}} \right]. \quad (4)$$

В работе [18] для одиночной стенки из композиционного материала (смесь Е-стекловолокна и эпоксидной смолы с плотностью $\rho_{\text{ст}} = 1,8 \text{ г/см}^3$) используется БПУ, отличающееся от (4) лишь числовым коэффициентом: вместо 0,93 в (4) в уравнении из [18] используется коэффициент 1,28.

В работах [1, 3, 19] используется БПУ в параметрическом виде:

$$d_{\text{кр}} = \left[\frac{\rho_{\text{ст}}^k l_{\text{ст}}}{K_{\Pi} K_1 \rho_{\text{ч}}^{\beta} (v \cos \theta)^{\xi}} \right]^{1/\lambda}. \quad (5)$$

Для этого уравнения параметры (постоянные K_{Π} , K_1 и показатели степени λ , k , β , ξ), приводимые различными авторами, представлены в табл. 2.

Относительно БПУ (5) с параметрами из табл. 2 следует сделать ряд замечаний.

Во-первых, равенство показателя степени k нулю в уравнениях (5.6–5.11) (табл. 2) свидетельствует о том, что $\rho_{\text{ст}}$ в БПУ отсутствует. В силу этого, эти уравнения невозможно использовать для анализа влияния плотности (а, следовательно, и массы) материала стенки на ВПП.

Во-вторых, в уравнении (5.12) (табл. 2) показатель степени $\beta = 0$, т.е. отсутствует зависимость от плотности (массы) высокоскоростной частицы. В силу этого использовать БПУ для анализа влияния плотности (и массы!) частицы на ВПП не представляется возможным.

Таблица 2

Значения параметров для БПУ одиночной стенки

№	Наименование БПУ [1]	K_n	K_1	λ	k	β	ξ
5.1	<i>Pailer-Grun</i>	1,0	0,770	1,212	0,500	0,737	0,875
5.2	<i>Naumann, Jex, Johnson</i>	1,0	0,650	1,056	0,500	0,500	0,875
5.3	<i>Gardner</i>	1,0	$0,608\sigma^{-0,093}$	1,059	0,343	0,686	0,976
5.4	<i>McDonnell&Sullivan (M&S)</i>	1,0	$0,756[\sigma_{Al}/\sigma]^{0,134}$	1,056	0,476	0,476	0,806
5.5	<i>Gardner, McDonnell, Collier</i>	1,0	$0,85A^{-0,153}$	1,056	0,382	0,763	0,763
5.6	<i>ESABASE</i> (толстая пластина)	1,8÷3,0	0,200÷0,330	1,056	0	0,519	2/3
5.7	<i>ESABASE</i> (тонкая пластина)	1,0	0,260÷0,640	1,056	0	0,519	0,875
5.8	<i>Multi-layer insulation</i> (многослойная изоляция)	1,0	0,370	1,056	0	0,519	0,875
5.9	<i>Frost</i>	1,0	0,430	1,056	0	0,519	0,875
5.10	<i>Naumann</i>	1,0	0,326	1,056	0	0,499	2/3
5.11	<i>Cour-Palais</i> (толстая стеклянная мишень)	1,85÷7,0	0,530	1,060	0	0,500	2/3
5.12	<i>McHugh&Richardson</i> (толстая стеклянная мишень)	1,85÷7,0	0,640	1,200	-0,500	0	2/3

Примечание. $A = \sigma/6,895$; σ – напряжения текучести материала стенки (МПа); σ_{Al} – значение для алюминия.

Как видим, согласно сформулированным выше требованиям к баллистическим предельным уравнениям, уравнения (5.6–5.12) непригодны для проведения сравнительного анализа защиты от ММ/КМ.

Оставшиеся пять уравнений (5.1–5.5) (табл. 2), согласно требованиям к БПУ, имеют относительно полный набор параметров (для частицы и материала стенки) и пригодны для проведения сравнительного анализа защиты от ММ/КМ.

Прежде чем перейти к численным оценкам, отметим, что в отдельных случаях на поверхность одиночной стенки из пластичного материала со стороны удара наносится многослойная изоляция (МИ). В этом случае, если зазор между МИ и стенкой отсутствует, а критерием отказа является перфорация пластины под МИ, для оценки $d_{крМИ}$ – критического диаметра частицы при наличии МИ на пластине – может использоваться рекомендуемое многими авторами БПУ [18]:

$$d_{крМИ} = d_{кр} + 2,2 \frac{m_{МИ}}{\rho_{ч}^{0,47}(v\cos\theta)^{0,63}} \quad (6)$$

Здесь $m_{МИ} = l_{МИ} \rho_{МИ}$ – поверхностная плотность МИ, г/см²; $l_{МИ}$, $\rho_{МИ}$ – толщина и плотность материала изоляции, соответственно.

Как видим, при вычислении $d_{крМИ}$ для пластины с МИ к величине критического

диаметра частицы $d_{кр}$ без МИ (БПУ рассмотрены выше) добавляется величина, зависящая от поверхностной плотности многослойной изоляции. Ясно, что характеристика МИ, как материала, препятствующего проникновению частицы в стенку, не ограничивается только некоторой средней плотностью $\rho_{МИ}$. Очевидно, иные характеристики МИ должны учитываться множителем перед вторым слагаемым в уравнении (6).

С использованием уравнений (1–3.2) и (5) были выполнены численные оценки критических диаметров $d_{кр}$ ударяющей частицы для двух пластичных материалов стенки, заметно отличающихся плотностью, а именно, для нержавеющей стали ($\rho_{ст} = 7,84$ г·см⁻³) и сплава алюминия АМг6 ($\rho_{ст} = 2,64$ г·см⁻³). Для обеспечения сравнительного анализа результатов толщина стенки во всех расчетах принималась равной 0,2 см. Другие необходимые исходные данные, используемые в расчетах, приведены в табл. 3. Результаты расчетов представлены на рис. 4.

Уравнения (1.1) и (2) были выбраны для численного анализа в силу использования в них наиболее полного набора исходных данных для материала стенки: плотности, скорости звука и твердости по Бринеллю. БПУ с таким набором характеристик для подвергнутого высокоскоростному удару материала в литературе больше обнаружить не удалось.

Исходные данные при расчетах одиночной стенки

Обозначение	Наименование параметра-характеристики	Нержавеющая сталь	АМг6	Размерность
a	Скорость звука в материале стенки	5,740	5,258	км·с ⁻¹
H_B	Твердость по Бринеллю материала стенки	150	60	МПа
$\rho_{ст}$	Плотность материала стенки	7,84	2,64	г·см ⁻³
$\rho_ч$	Плотность материала частицы	2,5	2,5	г·см ⁻³
θ	Угол между вектором скорости частицы и нормалью к поверхности стенки	0	0	°
v	Скорость частицы	Var.	Var.	км·с ⁻¹
σ	Напряжение текучести	758,5	275,8	МПа

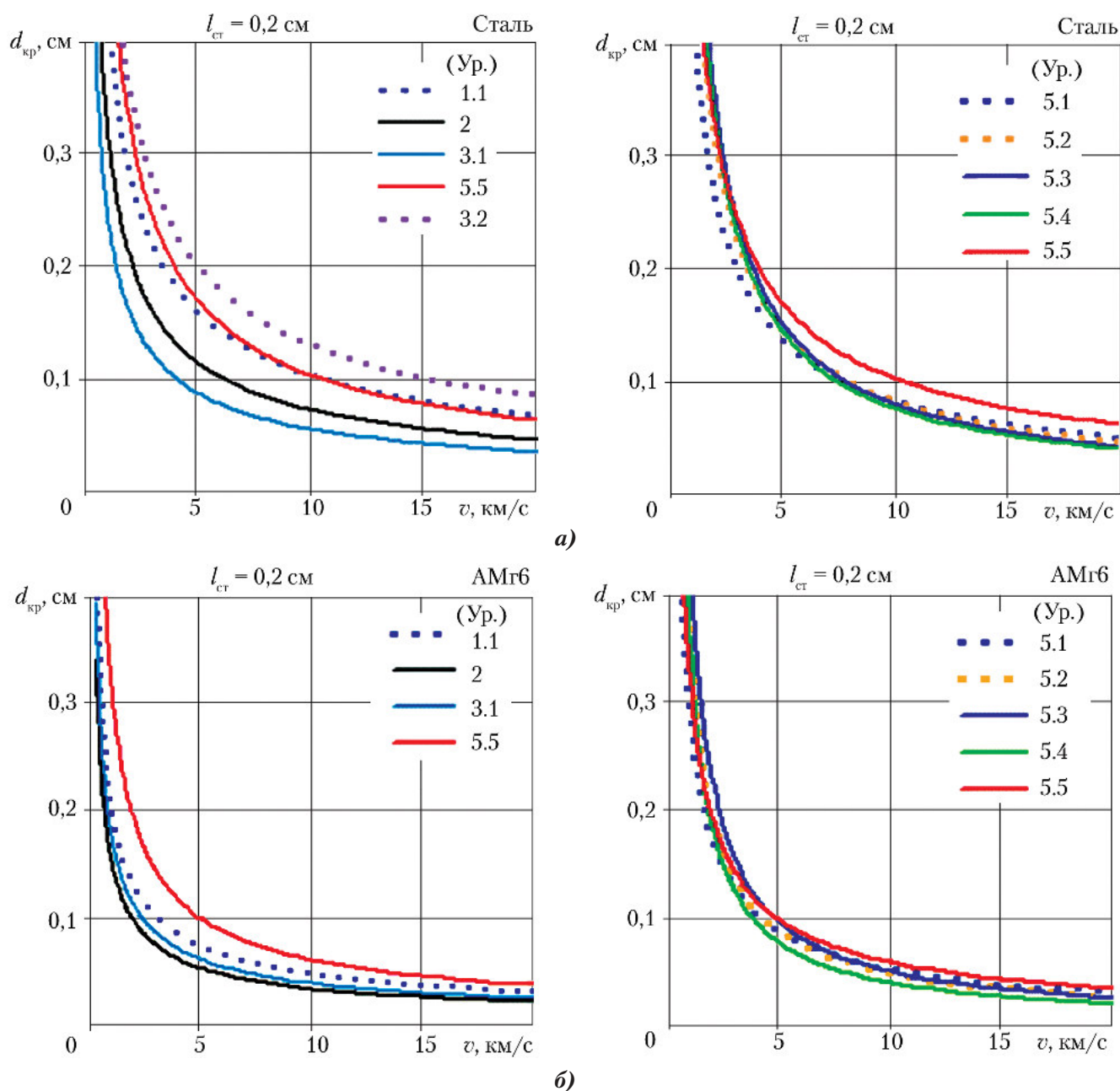


Рис. 4. Зависимость критического размера частицы $d_{кр}$ от ее скорости v : а – для нержавеющей стали; б – для сплава алюминия АМг6

Примечание. Номера кривых соответствуют номерам уравнений, по которым выполнялись расчеты, включая обозначения, принятые в табл. 2.

Уравнение (3.1) было выбрано нами для анализа, исходя из утверждения в работе [17], что оно пригодно для оценки пробоя многих пластичных материалов (сталь, алюминевые сплавы, титан и др.). При этом, как следует из самого уравнения, использование конкретных характеристик материала ограничено — учитывается только плотность материала.

Остальные уравнения представляют интерес в силу того, что они предложены или продолжают использоваться для расчета $d_{кр}$ в последние годы (после 2009 г.).

Кривая 5.5 в левой части рис. 4 служит для наглядного сравнения $d_{кр}$ со значениями в правой его части.

Выполненные расчеты позволяют сделать два следующих замечания относительно рассмотренных БПУ.

Во-первых, более ранние БПУ (2) (1977 г.) и (3.1) (1983 г.) дают более низкие значения $d_{кр}$ (кривые 2 и 3.1 на рис. 4), и, следовательно, более пессимистичный прогноз с точки зрения ВВП. Различие особенно наглядно проявляется при сопоставлении кривых 3.1 (БПУ₁₉₈₃) и 3.2 (БПУ₂₀₀₉) для стали. Возможной причиной отмеченных расхождений является более полный набор экспериментальных данных при построении более поздних БПУ.

Во-вторых, предлагаемые к использованию в настоящее время БПУ дают достаточно компактно располагаемые функции повреждения 5.1–5.5 как для стали (рис. 4, а), так и для сплава алюминия (рис. 4, б) (см. правую часть рисунка), что повышает степень доверия к таким уравнениям как к средству прогноза ВВП. С достаточной степенью согласования в среду БПУ (5.1–5.5) вписывается и уравнение (1.1). Как для стенки из стали, так и из сплава алюминия отличие по величине $d_{кр}$ для этих уравнений составляет ~25%. При этом, что немаловажно, значения $d_{кр}$ увеличиваются, и мы будем иметь более оптимистичный прогноз по ВВП.

В силу сделанных замечаний мы полагаем, что результаты, получаемые с использованием БПУ (2) и (3.1), построенных на ограниченном массиве экспериментальных данных, менее достоверны, чем получаемые с использованием уравнений (1.1) и (5.1–5.5). Кроме этого, учитывая требования к БПУ (см. выше), очевидно, что для проведения сравнительных оценок $d_{кр}$ наиболее приемлемы уравнения с максимальным числом физических параметров. В нашем случае такими уравнениями являются (1.1), (5.3) и (5.5).

Баллистические предельные уравнения для многостеночной защиты

Гораздо труднее выбрать БПУ для сравнительных оценок $d_{кр}$ в случае защиты, состоящей из двух и более стенок. В самом общем случае полагается, что стенки находятся на известном расстоянии S друг от друга (см. рис. 2). Прежде чем перейти к рассмотрению БПУ, следует сделать ряд замечаний относительно передней стенки защиты — бампера.

Бампер — это «жертвенная» достаточно тонкая стенка со стороны удара высокоскоростной частицы. Основная функция, возлагаемая на бампер — разбить налетающую частицу на множество фрагментов и максимально рассеять их в пространстве за бампером. Отметим, что облако за бампером содержит как фрагменты частицы, так и бампера.

В различных источниках рекомендовано выбирать предварительную толщину бампера, пользуясь следующим соотношением (см., например, [18]):

$$l_6 = c_6 \left(\frac{\rho_ч}{\rho_6} \right) d, \quad (7)$$

где константа $c_6 = 0,25$, когда $S/d < 30$, и $c_6 = 0,20$, когда $S/d \geq 30$; d — диаметр высокоскоростной частицы (иногда накладывается условие перфорации задней стенки, т. е. рассматривается $d_{кр}$); $\rho_6, \rho_ч$ — плотности материала бампера и налетающей частицы, соответственно; S — расстояние от бампера до задней стенки (см. рис. 2).

Как показали многочисленные эксперименты, обсуждение которых можно найти в работах [1, 3, 4, 11, 12, 20], облако фрагментов от разрушения частицы и бампера, воздействующее на заднюю стенку, содержит различное количество твердых, жидких и парообразных компонентов. Параметры облака зависят от толщины и материала бампера (плотности), а также от условий воздействия на бампер: размера и материала (плотности) частицы, скорости удара, наклона удара.

При низких скоростях удара, $v_n \leq v_n$ (низкоскоростной режим — см. рис. 3), воздействие ударных давлений является незначительным, и частица сохраняет целостность после прохождения через бампер. В этом случае задняя стенка подвергается удару деформированной или слегка раздробленной частицы.

При скоростях *переходного режима* ($v_n < v_n < v_n$) частица фрагментируется и рассеивается за бампером. С ростом скорости фрагментация частицы и рассеяние осколков усиливаются, появляется и растет содержание жидких фрагментов.

При скоростях $v_n \geq v_b$ (*высокоскоростной режим*) происходит интенсивное плавление и испарение фрагментов от разрушения частицы и бампера. По мере увеличения скорости количество твердых фрагментов значительно сокращается.

Скорости v_n и v_b смены режимов разрушения частицы и бампера определяются при согласовании результатов расчетов по БПУ с экспериментальными данными. Некоторые авторы вводят зависимость этих скоростей от угла удара. На сегодняшний день в используемых БПУ для различных пакетов защиты значение v_n , как правило, является постоянным и лежит в диапазоне 2,5...4,5 км/с, а v_b – в диапазоне 6,5...8,5 км/с. Наиболее часто используются следующие значения: $v_n = 3$ км/с; $v_b = 7$ км/с.

Вернемся к БПУ. Схема последовательной модификации наиболее известных и используемых баллистических предельных уравнений (для двух и более стенок) в процессе их совершенствования показана на рис. 5. Наименования уравнений приняты согласно используемым в работах [1, 3, 4, 11, 12] и др.

Кроме указанных на рис. 5, в литературе относительно часто можно встретить ссылки на БПУ следующих авторов [11]: *Lundeberg-Stern-Bristow* (1965 г.), *Nysmith* (1969 г.), *Wilkinson* (1969 г.), *Burch* (1967 г.). Более поздние модификации уравнений этих авторов нам обнаружить не удалось.

Вначале проанализируем БПУ, приведенные в работах [1, 3, 4, 19]. В них наиболее полно представлены БПУ, используемые в настоящее время в различных космических

агентствах, включая NASA. Все эти уравнения в основе имеют модифицированное уравнение Кур-Паласа (*Christiansen–Cour-Palais*) для защиты Уиппла. Все эти уравнения можно представить в следующем параметрическом виде:

$$d_{кр} = \left[\frac{(K_0 I_{ст}^\omega + K_2 I_6^\mu \rho_6^{v_2}) S^\delta}{K_1 \rho_{ст}^k \rho_6^{v_1} \rho_ч^\beta v^\gamma (\cos\theta)^\xi} \right]^{1/\lambda} \quad (8)$$

Здесь использованы обозначения согласно табл. 1.

Отличие БПУ (8) от уравнения (5) для одиночной стенки заключается в добавлении членов, учитывающих зависимость от характеристик бампера: толщины l_6 , плотности его материала ρ_6 и расстояния S от бампера до задней стенки. Добавлена также постоянная K_0 .

Для уравнений, представленных в работах [1, 19] для двустенной защиты, константы и показатели степени переменных для уравнения (8) приведены в табл. 4.

Три первых уравнения из табл. 4 не представляют интереса, так как толщина бампера и плотность его материала исключены из рассмотрения ($K_2 = 0$ и $v_1 = 0$).

Относительно последнего уравнения в табл. 4 следует отметить, что его использование для проведения оптимизации защиты от ММ/КМ не представляется корректным в силу отсутствия зависимости $d_{кр}$ от расстояния между бампером и задней стенкой S (так как $\delta = 0$). Таким образом, учитывая требования к БПУ (см. выше), уравнения с параметрами из табл. 4 непригодны для сравнительного анализа защиты от ММ/КМ.

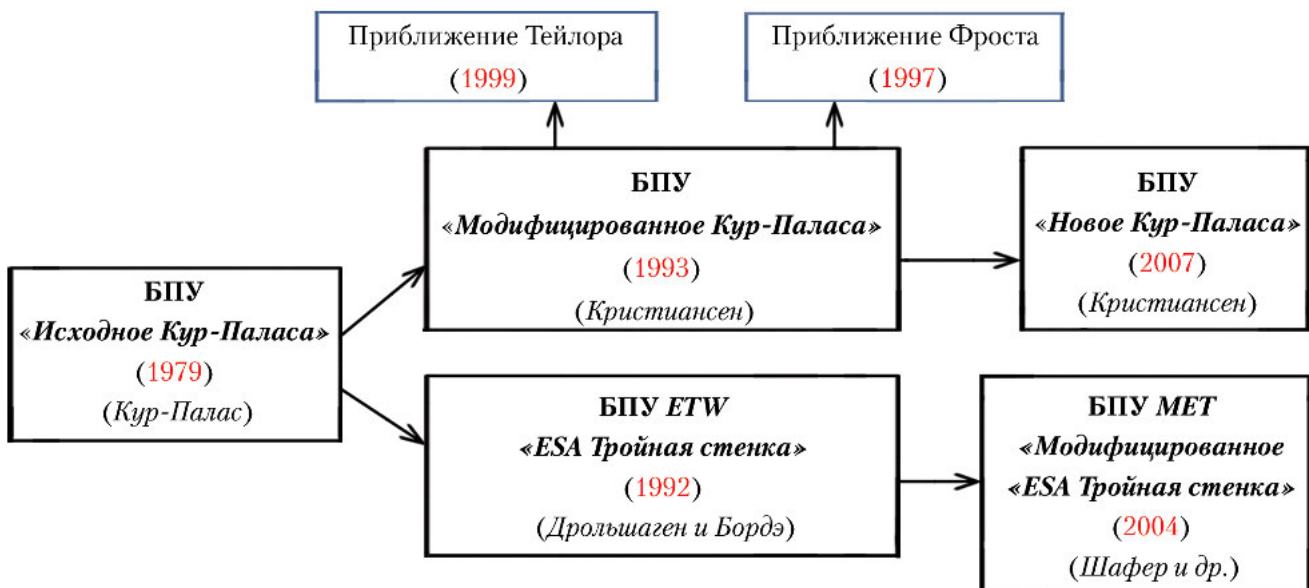


Рис. 5. Прогрессивная схема модификации БПУ

Примечание. ESA (European Space Agency) – Европейское космическое агентство; ETW (ESA Triple Wall) – тройная стенка ESA; MET (Modified ESA Triple Wall) – модифицированная тройная стенка ESA.

Таблица 4

Величины параметров в БПУ для двойной стенки

Уравнение [1, 19]	Переменные, константы и показатели степени переменных									
	—	—	—	ρ_v	v	$\rho_{ст}$	S	$\cos\theta$	ρ_6	l_6
	K_1	K_2	λ	β	γ	k	δ	ξ	v_1/v_2	μ
<i>Cour-Palais</i>	0,044A	0	1	0,5	1	0,167	0,5	1	0/-	—
<i>Multi-layer insulation</i>	0,034A	0	1	0,5	1	0,167	0,5	1	0/-	—
<i>Maiden-McMillan</i>	$K_n(\pi/6)A$	0	3	1	1	0	2	1	0/-	—
<i>ESA: $v < 3$ км/с</i> <i>$v > 9,5$ км/с</i>	0,255÷0,637 ($\pi/6$)A	1 0	1,056 3	0,519 1	0,875 1	0 0	0 0	0,875 1	0/0 0/-	1 —

Примечание. Во всех уравнениях таблицы в виде (8) $K_0 = 1$ и $\omega = 1$; $A = (\sigma^*/\sigma_{ст})^{0,5}$; напряжение текучести $\sigma^* = 482,8$ МПа; $\sigma_{ст}$ — в МПа; K_n — критерий повреждения.

Обратимся теперь к уравнениям, которые используются для расчета защиты, состоящей из нескольких стенок. БПУ и в этом случае записываются в виде, аналогичном уравнению (8). Константы K_0, K_1, K_2 и показатели степеней переменных выбираются в процессе согласования с экспериментальными данными. Следует отметить, что для диапазонов скорости $v_n \leq v_n$ и $v_n \geq v_n$ БПУ, как правило,

описывается отдельным набором констант и показателей степени переменных. Для переходного режима ($v_n < v_n < v_n$) $d_{кр}$ вычисляется как линейная интерполяция по его значениям на границах, т. е. при скоростях v_n и v_n .

Наиболее широко используемые в настоящее время БПУ, их название и значения параметров (согласно [1, 3, 4, 18–21]) приведены в табл. 5.

Таблица 5

Значения параметров в многостеночных БПУ

Уравнение	v , км/с	Переменные, константы и показатели степени переменных										
		—	—	ρ_v	v	$\rho_{ст}$	S	$\cos\theta$	ρ_6	l_6	—	—
		K_1	K_2	β	γ	k	δ	ξ	v_1/v_2	μ	λ	K_0
1. <i>Modified Cour-Palais</i> [3, 4, 11, 20]	$v < 3$	0,6A	$1,667K_1$	0,5	2/3	0	0	5/3	0/0	1	1,056	1
	$v > 7$	0,129B	0	0,5	1	0	0,5	1	0,167/0	0	3/2	1
2. <i>ESA + Triple</i> [1, 3, 4]	$v < 3$	0,312A	$1,667K_1$	0,5	2/3	0	0	5/3	0/0	1	1,056	1
	$v > 7$	0,107B	0	0,5	1	0	0,5	1	0,167/0	0	3/2	1
3. <i>NASA₁ + ISS</i> [1, 3, 4]	$v < 3$	0,6A	$1,667K_1$	0,5	2/3	0	0	5/3	0/0	1	1,056	1
	$v > 7$	$[3,918B]^{-3/2}$	0	0,5	1	0	0,5	1	0,167/0	0	3/2	1
4. <i>NASA₂ + Shock</i> [1]	$v < 3$	0,3A	$1,233K_1$	0,5	2/3	0	0	5/3	0/1	1	1,056	1
	$v > 6$	22,545A	0	1	1	-1	2	1	0/0	0	3	1
5. <i>NASA₃ + Bumper</i> [1]	$v < 3$	0,4A	$0,925K_1$	0,5	2/3	0	0	5/3	0/1	1	1,056	1
	$v > 6$	18,224A	0	1	1	-1	2	1	0/0	0	3	1
6. <i>New Cour-Palais</i> [4, 11]	$v_n \leq 4,2$	0,6	1	0,5	2/3	0	0	4/3	0/0	1	1,056	$1/(A \cdot K_{01})$
	$v_n \geq 8,4$	$K_{11}^{2/3}C$	0	1/3	2/3	0	1/3	4/3	0,111/0	0	1	1,155
7. <i>MET</i> [3, 4]	$v_n \leq 3$	0,6	1	0,5	2/3	0	0	5/3	0/0	1	1,056	1/A
	$v_n \geq 7$	C	0	1/3	2/3	0	1/3	2/3	0,111/0	0	1	E

Примечание. $A = (\sigma_{ст}/275,8)^{-0,5}$; $B = (\sigma_{ст}/482,8)^{-0,5}$; $C = (\sigma_{ст}/482,8)^{1/3}$; $\sigma_{ст}$ — предел текучести материала задней стенки, МПа. В уравнениях 6 и 7 при высоких скоростях ($v_n \geq 8,4$ и $v_n \geq 7$) $\omega = 2/3$; во всех остальных уравнениях $\omega = 1$.

Постоянная E (см. K_0 для уравнения 7) зависит от типа защиты: $E = 2,9754$ — для защиты типа Уиппла с многослойной изоляцией (МИ) впереди; $E = 3,9180$ — для защиты типа Уиппла без МИ; $E = 5,2002$ — для защиты типа Уиппла с наполнителем и МИ впереди.

Все эти уравнения представляют разные варианты модифицированного уравнения Кур-Паласа. Как видим, первые три уравнения отличаются только константой K_1 . Два следующих уравнения также близки — показатели степени совпадают для всех переменных.

Постоянные K_{01} и K_{11} для *Нового уравнения Кур-Паласа (New Cour-Palais)* полагаются равными: $K_{01} = 1$; $K_{11} = 0,16$ [3, 4]. Рекомендуется уточнять эти постоянные через согласование $d_{кр}$ при получении новых экспериментальных данных. Так, например, в работе [12] для сотовой защиты с углепластиком $K_{01} = 1,1$; $K_{11} = 0,4$. При наличии МИ за бампером $K_{01} = 0,7$; $K_{11} = 0,16$ [18].

Использование физических параметров в БПУ для многостеночной защиты показано в табл. 6. Отмеченные цветом области в табл. 6 указывают на то, что данная физическая переменная используется в БПУ. Неокрашенные области — использование переменной в уравнении отсутствует (соответствующий показатель степени равен нулю).

Отсутствие $\rho_{ст}$ ($k = 0$) в БПУ в качестве характеристики материала задней стенки объясняется использованием напряжения текучести материала $\sigma_{ст}$ как его основной характеристики (при вычислении постоянных K_1 и K_2). В отдельных случаях, например, в уравнениях *Shock* и *Bumper*, используются как $\rho_{ст}$, так и $\sigma_{ст}$.

Отсутствие S ($\delta = 0$) в БПУ при $v_n \leq 3$ км/с связано с тем, что бампер является достаточно тонким, и частица ММ/КМ преодолевает его без фрагментации при этих скоростях. То есть обломки частицы и их рассеяние отсутствуют, а, следовательно, отсутствует и влияние S .

Отсутствие l_6 ($\mu = 0$) в БПУ при высокоскоростном режиме объясняется тем, что бампер достаточно тонкий и выбран в соответствии с уравнением (7). В этом режиме, из-за

наличия рассеяния фрагментов от разрушения бампера и частицы, становится существенным влияние S . Для низкоскоростного режима толщина бампера l_6 учитывается всегда.

Отсутствие ρ_6 ($v_1 = 0$ и $v_2 = 0$) в БПУ высокоскоростного режима свидетельствует о том, что уравнение получено для бампера из алюминия или его сплава. То есть рассматривается случай с заведомо известной плотностью материала бампера. Отсутствие плотности материала бампера при низких скоростях (низкоскоростной режим) связано с тем, что бампер является достаточно тонким, и частица ММ/КМ преодолевает его без фрагментации. Тем не менее, в отдельных случаях и при низких скоростях плотность материала бампера учитывается, например, в уравнениях $NASA_2$ и $NASA_3$ — см. табл. 5 и 6.

Далее мы остановимся на БПУ $NASA_1 + ISS$ (см. табл. 5). Выбор этого БПУ был сделан в силу следующих причин:

1. В работе [3] это БПУ предложено использовать для защиты типа Уиппла, т. е. для бампера и стенки (двойной стенки).

2. БПУ этого типа прошли достаточно широкую апробацию через сравнение $d_{кр}$ с экспериментальными данными [2, 18, 21]. Например, в статье [2] это БПУ привлекалось для оценок при сопоставлении расчетов с экспериментальными данными для элементов сотовой защиты. В работе [20] уравнение использовалось для сравнительных оценок при увеличении скорости частицы до 150 км/с.

3. БПУ пригодно для использования в случае, когда толщина бампера l_6 удовлетворяет уравнению (7) [18].

4. БПУ пригодно для бамперов из алюминия и металлических задних стенок [3]. Уравнение может быть использовано для прочных неметаллических задних стенок с пределом текучести до 690 МПа [3, 22].

Таблица 6

Использование переменных в современных БПУ

Уравнение	v , км/с	ρ_4	v	θ	$l_{ст}$	$\rho_{ст}$	$\sigma_{ст}$		S	l_6	ρ_6
		β	γ	ξ	ω	k	K_1	K_2	δ	μ	v_1/v_2
<i>NASA₂, NASA₃</i>	<3										
<i>ESA</i>											
<i>NASA₁</i>											
<i>Modified Cour-Palais</i> <i>New Cour-Palais</i> <i>MET</i>											
<i>Triple</i> <i>ISS</i> <i>Modified Cour-Palais</i> <i>New Cour-Palais</i> <i>MET</i>	>7										
<i>Shock</i> <i>Bumper</i>	>6										

Мы приводим это уравнение с подстановкой соответствующих констант и показателей степени, включая линейную интерполяцию уравнения в переходном режиме:

- для $v_n \leq 3$ км/с:

$$d_{кр} = \left[\frac{l_{ст} \left(\frac{\sigma_{ст}}{275,8} \right)^{1/2} + l_6}{0,6\rho_q^{1/2} v_n^{2/3} \cos\theta} \right]^{18/19}; \quad (8.1)$$

- для $v_n \geq 7$ км/с:

$$d_{кр} = \frac{1,155}{K_{11}^{2/3}} \frac{l_{ст}^{2/3} \left(\frac{\sigma_{ст}}{482,8} \right)^{1/3} S^{1/3}}{\rho_6^{1/9} \rho_q^{1/3} v_n^{2/3}} =$$

$$= 3,918 \frac{l_{ст}^{2/3} \left(\frac{\sigma_{ст}}{482,8} \right)^{1/3} S^{1/3}}{\rho_6^{1/9} \rho_q^{1/3} v_n^{2/3}}; \quad (8.2)$$

- для $3 < v_n < 7$ км/с:

$$d_{кр} = \left[1,75 - \frac{v_n}{4} \right] \left[\frac{l_6 + \left(\frac{\sigma_{ст}}{275,8} \right)^{1/2} l_{ст}}{1,248\rho_q^{1/2} \cos\theta} \right]^{18/19} +$$

$$+ \left[\frac{v_n}{4} - 0,75 \right] \left[\frac{1,071 l_{ст}^{2/3} \left(\frac{\sigma_{ст}}{482,8} \right)^{1/3} S^{1/3}}{\rho_q^{1/3} \rho_6^{1/9}} \right]. \quad (8.3)$$

Проведем численный анализ, используя уравнения (8.1–8.3). В качестве материалов бампера и задней стенки будем использовать АМг6 с исходными данными, представленными в табл. 3. Константы $K_{01} = 1$; $K_{11} = 0,16$. Отметим, что толщина бампера выбрана в соответствии с соотношением (7).

Прежде всего, рассмотрим предельный случай: переход от защиты с бампером к защите из одной стенки. Для этого полагаем S относительно малым ($S = 0,01$ см), и, чтобы сохранить толщину задней стенки, уменьшим плотность материала бампера до $\rho_6 = 0,01$ г/см³. Поскольку в начальном варианте плотности материала бампера и стенки одинаковы, а толщина бампера в двустенной защите равнялась 0,03 см, толщина задней стенки при переходе к одностенной защите увеличивается на 0,0003 см ($l_6 \cdot 0,01 = 0,0003$ см). В расчетах толщина задней стенки принималась равной 0,2 см. Результаты расчетов при нормальном ударе согласно уравнениям (8.1–8.3) для защиты с бампером в предельном случае и по уравнению (5.5) для одиночной стенки (табл. 2) представлены на рис. 6.

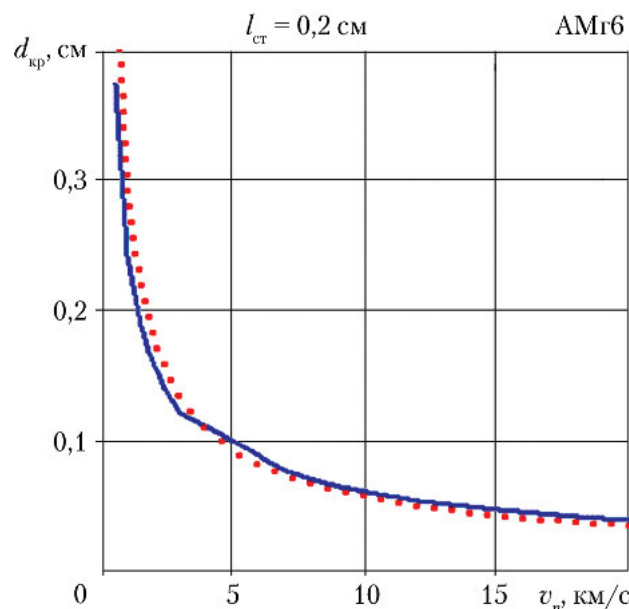


Рис. 6. Предельный переход двустенной модели в одностенную: — предельный случай стенки с бампером; - - - 5.5
Примечание. Кривая 5.5 построена согласно уравнению (5.5) (табл. 2).

Наблюдается более чем удовлетворительное согласование функций повреждения, что указывает на выполнение одного из требований, предъявляемых к БПУ, пригодных для сравнительного анализа: возможность расширения диапазона изменения оптимизируемых параметров до уровня предельных переходов.

Отметим одну особенность, наблюдаемую при трансформации уравнений (8.1–8.3) для случая защиты из одной стенки. Эта особенность связана с наличием $\cos\theta$ в уравнении (8.1). Если в случае уравнений для одиночной стенки зависимость от угла присутствует только при вычислении нормальной составляющей скорости, то в уравнении (8.1) показатели степени скорости частицы и $\cos\theta$ не совпадают, т. е. даже при одной и той же нормальной составляющей скорости зависимость функции повреждения от θ сохраняется. Влияние угла наклона θ в случае предельного перехода к конструкции из одной стенки показано на рис. 7, а.

На рис. 7, б показано влияние угла θ вне зависимости от нормальной составляющей скорости: по оси абсцисс отложена абсолютная величина скорости ударяющей частицы.

На рис. 7, в–е показаны изменения функции повреждения при варьировании других характеристик защиты с бампером, а именно: рис. 7, в — предела текучести материала задней стенки ($\sigma_{ст}$); рис. 7, г — толщины задней стенки ($l_{ст}$); рис. 7, д — расстояния от бампера до задней стенки (S); рис. 7, е — плотности материала ударяющей частицы (ρ_q).

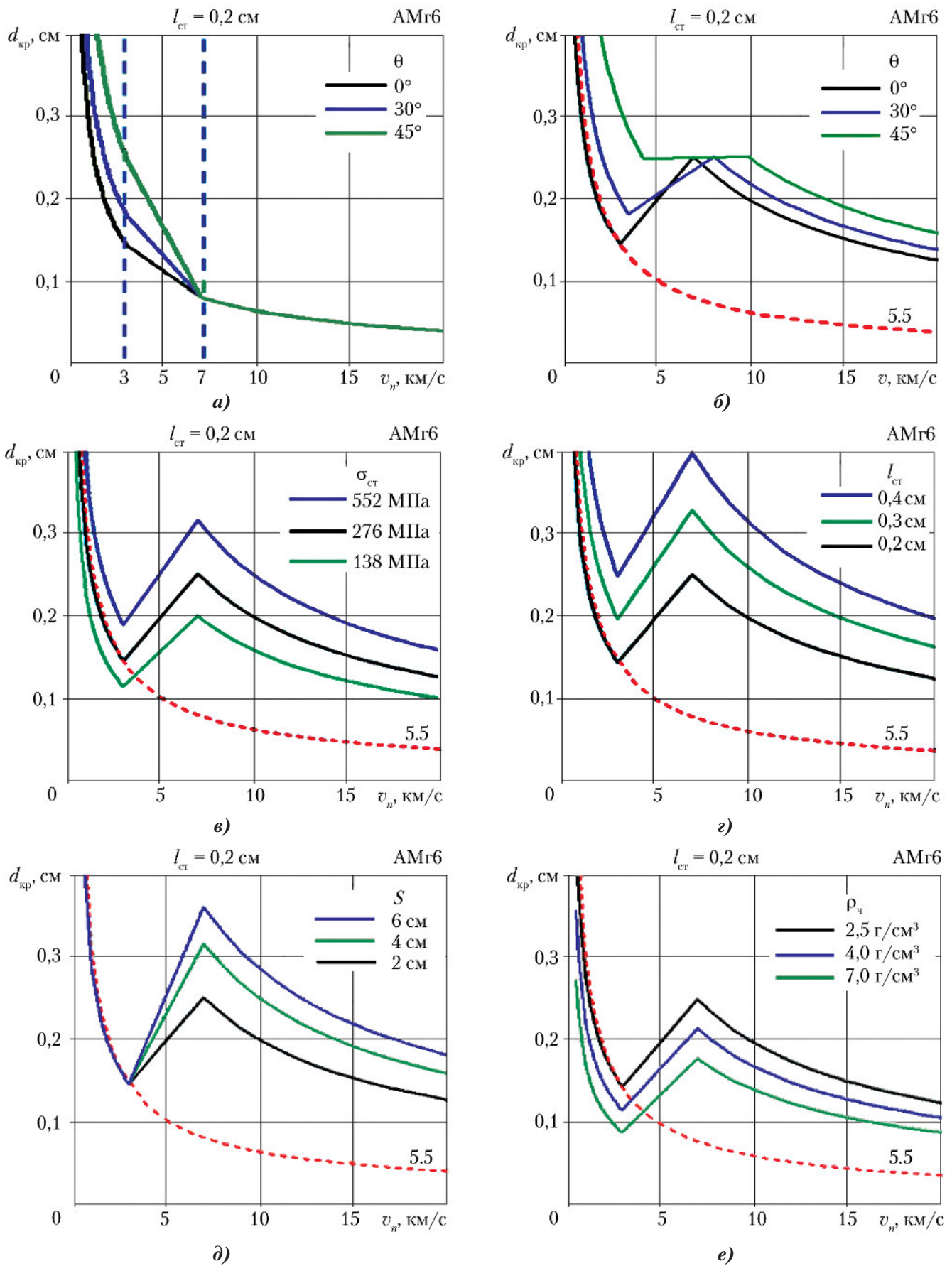


Рис. 7. Влияние на функцию повреждения: а, б – угла наклона θ ; в – предела текучести материала задней стенки σ_{cr} ; г – толщины задней стенки l_{cr} ; д – расстояния от бампера до задней стенки S ; е – плотности материала ударяющей частицы ρ_v
 Примечание. Варьирование переменных производится от следующих исходных величин: $\theta = 0^\circ$; $l_{cr} = 0,2$ см; $\sigma_{cr} = 276$ МПа; $S = 2$ см; $l_0 = 0,055$ см; $\rho_0 = 2,85$ г/см³; $\rho_v = 2,5$ г/см³; — исходный вариант расчета.

Кривая 5.5 на рис. 7, как и выше, представляет собой расчет для одиночной стенки и может быть использована для оценки уровня отклонений значения $d_{кр}$ для стенки с бампером от случая одиночной стенки.

Как видим, уравнения (8.1–8.3) являются достаточно чувствительными к изменению всех существенных характеристик защиты с бампером, что весьма важно при проведении сравнительных расчетов с целью оптимизации защиты от ММ/КМ. Кроме этого, расчеты показали, что для скоростей ударяющей частицы менее 20 км/с предельные критические размеры частиц практически достигаются в конце баллистического режима.

Необходимо отметить, что рассмотренные выше БПУ получены (или проверены) в результате экспериментальных исследований высокоскоростного удара частицами с диаметром от долей миллиметра (массой 10^{-7} г) до ~2 см (~30 г) [1–4, 7–9, 11, 18, 21].

Выводы

В силу вышесказанного можно сделать следующие выводы:

Использование БПУ, полученных для алюминия и его сплавов, при прогнозировании $d_{кр}$ для других материалов приводит к ~25% погрешности. Это указывает на то, что в БПУ значительная часть информации о физике процесса соударения частицы со стенкой содержится в числовых коэффициентах (не выражена через его физические параметры — плотность, предел текучести, твердость по Бринеллю, скорость звука и/или др.).

На основании общих требований к БПУ, пригодных для проведения сравнительного анализа защиты от ММ/КМ, наиболее приемлемыми для проведения сравнительных оценок $d_{кр}$ для защиты, состоящей из одиночной стенки, являются уравнения (1.1), (5.3) и (5.4). Использование конкретного уравнения зависит от доступного набора исходных данных.

Для случая, когда рассматриваемый пакет защиты от ММ/КМ может быть сведен к защите Уиппла, предложен более общий параметрический вид БПУ (8). Из множества рассмотренных БПУ уравнения (8.1–8.3) выделяются как наиболее пригодные для проведения сравнительного анализа защиты от частиц ММ/КМ с диаметром до ~2 см и массой до ~30 г.

Из выполненных расчетов следует, что для стенки с бампером минимальные диаметр и масса пробивающей частицы имеют место к концу низкоскоростного режима. При этих скоростях и рекомендуется проводить экспериментальные исследования.

Список литературы

1. Gäde A., Miller A. *Project: ESABASE2/Debris Release 6.0. Technical Description. Ref. R077-231rep_01_03_01_Debris_Technical_Description.doc. 2013-07-05.* Режим доступа: <http://esabase2.net/wp-content/uploads/2013/07/ESABASE2-Debris-Technical-Description.pdf> (дата обращения 29.11.2015 г.).
2. Добрица Д.Б. Теоретико-экспериментальная оценка стойкости сотовых панелей космического корабля при воздействии метеорно-техногенных частиц // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2014. № 2(28). С. 58–68. Режим доступа: <http://sun.tsu.ru/mminfo/000063105/mat/28/image/28-058.pdf> (дата обращения 29.11.2015 г.).
3. *Protection manual. IADC-04-03. Version 5.0. Inter-agency space debris coordination committee. Prepared by the IADC WG3 members. October, 2012.* Режим доступа: http://www.iadc-online.org/Documents/IADC-04-03_Protection_Manual_v5.pdf (дата обращения 29.11.2015 г.).
4. *Protection manual. IADC-04-03. Version 7.0. Inter-agency space debris coordination committee. Prepared by the IADC WG3 members. 19 September 2014.* Режим доступа: http://www.iadc-online.org/Documents/IADC-04-03_Protection_Manual_v7.pdf (дата обращения 29.11.2015 г.).
5. ГОСТ 25645.128-85. Вещество метеорное. Модель пространственного распределения. М.: Издательство стандартов, 1985. 24 с.
6. ГОСТ 25645.167-2005. Космическая среда (естественная и искусственная). Модель пространственно-временного распределения плотности потоков техногенного вещества в космическом пространстве. М.: Стандартинформ, 2005. 36 с.
7. Silvestrov V.V., Plastinin A.V., Gorshkov N.N. *Hypervelocity impact on laminate composite panels // International Journal of Impact Engineering. 1995. Vol. 17. Pp. 751–762.* Режим доступа: <http://www.ciar.org/ttk/mbt/papers/lakowski.2006-09/ijie-vol17pp751-762.pdf> (дата обращения 29.11.2015 г.).
8. Stanley G.L., Donald E.B., Nichole L.K., Horz K.F. *Morphology of meteoroid and debris impact craters formed in soft metal targets on the LDEF satellite // International Journal of Impact Engineering. 1995. Vol. 16. № 3. Pp. 405–418.* Режим доступа: http://www.eas.uccs.edu/~tlilly/SPCE_5065_13Su/R06/Love%20-%20Morphology%20of%20meteoroid%20and%20debris%20impact%20craters%20formed%20

in%20soft%20metal%20targets%20on%20the%20LDEF%20satellite.pdf (дата обращения 29.11.2015 г.).

9. Zolensky M.E., Zook H.A., Horz F., Atkinson D.R., Coombs C.R., Watts A.J., Dardano C.B., See T.H., Simon C.G., Kinard W.H. *Interim report of the meteoroid and debris special investigation group (1993)*. Режим доступа: <http://www.cs.odu.edu/~mln/ltrs-pdfs/cp3194-92-p277.pdf> (дата обращения 30.04.2015 г.).

10. Bernhard R.P., Christiansen E.L., Hyde J., Crews J.L. *Hypervelocity impact damage into Space Shuttle surfaces // International Journal of Impact Engineering*. 1995. Vol. 17. Pp. 57–68. Режим доступа: <http://www.ciar.org/ttk/mbt/papers/lakowski.2006-09/ijie-vol-17pp57-64.pdf> (дата обращения 29.11.2015 г.).

11. Kalinski M.E. *Hypervelocity impact analysis of International Space Station Whipple and enhanced stuffed Whipple shields*. Monterey, California, Naval. Naval Postgraduate School Monterey, CA 93943-5000. Illinois Institute of Technology. December 2004. Режим доступа: http://calhoun.nps.edu/bitstream/handle/10945/1233/04Dec_Kalinski.pdf?sequence=1 (дата обращения 14.04.2015 г.).

12. Shannon R. *Hypervelocity impact induced disturbances on composite sandwich panel spacecraft structures / A thesis submitted in fulfilment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy // School of Aerospace, Mechanical and Manufacturing Engineering Science, Engineering and Technology Portfolio. RMIT University. July 2007*. Режим доступа: <http://researchbank.rmit.edu.au/eserv/rmit:6801/Ryan.pdf> (дата обращения 29.11.2015 г.).

13. Schafer F.K., Herrwerth M., Hiermaier S.J., Schneider E.E. *Shape effects in hypervelocity impact on semi-infinite metallic targets // International Journal of Impact Engineering*. 2001. № 26. Pp. 699–711. Режим доступа: http://www.ciar.org/ttk/mbt/papers/ijie00/ijie_26_613.pdf (дата обращения 10.05.2015 г.).

14. Новиков Л.С. *Воздействие твердых частиц естественного и искусственного происхождения на космические аппараты*. Учебное пособие. М.: Университетская книга, 2009. 104 с. Режим доступа: <http://www.nerush.org/nerush/library/m-2013-2.pdf> (дата обращения 10.03.2014 г.).

15. 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. 53–58.

16. *Инженерный справочник по космической технике / Под ред. Солодова А.В. М.: Воениздат, 1977. 430 с.*

17. Бобков В.Н., Васильев В.В., Демченко Э.К., Лебедев Г.В., Овсянников В.А., Раушенбах Б.В., Сургучев О.В., Тимченко В.А., Феоктистов К.П., Фрумкин Ю.М., Черняев Б.В. *Космические аппараты / Под общ. ред. Феоктистова К.П. М.: Воениздат, 1983. 319 с.* Режим доступа: <http://kmapp.narod.ru/st006.htm> (дата обращения 19.01.2014 г.).

18. Christiansen E.L. *MMOD Protection Lead NASA Johnson Space Center Houston, TX 77058. Handbook for Designing MMOD Protection / NASA Johnson Space Center, NASA/TM-2009-214785. June 2009*. Режим доступа: <http://ston.jsc.nasa.gov/collections/TRS/techrep/TM-2009-214785.pdf> (дата обращения 28.11.2015 г.).

19. *Meteoroid and debris models / ESA Requirements and Standards Division. ESTEC, P.O. Box 299, 2200. AG Noordwijk, The Netherlands. The ECSS document ECSS-E-ST-10-04C (15 November 2008)*. Режим доступа: <https://www.spennis.oma.be/help/background/metdeb/metdeb.html> (дата обращения 28.11.2015 г.).

20. Iyer K.A., Mehoke D.S. *Interplanetary dust particle shielding capability of spacecraft multilayer insulation // Journal of spacecraft and rockets*. March–April 2015. Vol. 52. № 2. Pp. 584–594. Режим доступа: [http://www2.esm.vt.edu/~rbatra/pdfpapers/spacescraft\(584-594\)2015.pdf](http://www2.esm.vt.edu/~rbatra/pdfpapers/spacescraft(584-594)2015.pdf) (дата обращения 18.06.2015 г.).

21. Christiansen E.L. *Meteoroid/debris shielding / NASA Johnson Space Center Houston, Texas. August 2003. TP-2003-210788*. Режим доступа: <http://ston.jsc.nasa.gov/collections/TRS/techrep/TP-2003-210788.pdf> (дата обращения 28.11.2015 г.).

22. Christiansen E.L. *Design and performance equations for advanced meteoroid and debris shields // International Journal of Impact Engineering*. 1993. Vol. 14. Pp. 145–156. Режим доступа: <http://www.sciencedirect.com/science/journal/0734743X/14/1> (дата обращения 18.06.2015 г.).

Статья поступила в редакцию 20.04 2016 г.

Reference

1. Gäde A., Miller A. *Project: ESABASE2/Debris Release 6.0. Technical Description. Ref. R077-231rep_01_03_01_Debris_Technical_Description.doc*. 2013-07-05. Available at: <http://esabase2.net/wp-content/uploads/2013/07/ESABASE2-Debris-Technical-Description.pdf> (accessed 29.11.2015).

2. Dobritsa D.B. *Teoretiko-eksperimental'naya otsenka stoikosti sotovykh panelei kosmicheskogo korablya pri vozdeistvii meteorno-tekhnogennykh chastits* [Theoretical and experimental evaluation of the spacecraft honeycomb panel resistance on exposure to meteoric-anthropogenic particles]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika*, 2014, no. 2(28), pp. 58–68. Available at: <http://sun.tsu.ru/mminfo/000063105/mat/28/image/28-058.pdf> (accessed 29.11.2015).
3. *Protection manual. IADC-04-03. Version 5.0. Inter-agency space debris coordination committee. Prepared by the IADC WG3 members. October, 2012.* Available at: http://www.iadc-online.org/Documents/IADC-04-03_Protection_Manual_v5.pdf (accessed 29.11.2015).
4. *Protection manual. IADC-04-03. Version 7.0. Inter-agency space debris coordination committee. Prepared by the IADC WG3 members. 19 September 2014.* Available at: http://www.iadc-online.org/Documents/IADC-04-03_Protection_Manual_v7.pdf (accessed 29.11.2015).
5. GOST 25645.128-85. *Veshchestvo meteornoie. Model' prostranstvennogo raspredeleniya* [GOST 25645.128-85. Meteoric matter. The space distribution model]. Moscow, *Izdatel'stvo standartov publ.*, 1985. 24 p.
6. GOST 25645.167-2005. *Kosmicheskaya sreda (estestvennaya i iskusstvennaya). Model' prostranstvenno-vremennogo raspredeleniya plotnosti potokov tekhnogennogo veshchestva v kosmicheskom prostranstve* [GOST 25645.167-2005. Space environment (natural and artificial). The space-time density distribution model of anthropogenic matter flows in space]. Moscow, *Standartinform publ.*, 2005. 36 p.
7. Silvestrov V.V., Plastinin A.V., Gorshkov N.N. *Hypervelocity impact on laminate composite panels.* *International Journal of Impact Engineering*, 1995, vol. 17, pp. 751–762. Available at: <http://www.ciar.org/ttk/mbt/papers/lakowski.2006-09/ijie-vol17pp751-762.pdf> (accessed 29.11.2015).
8. Stanley G.L. Donald E.B., Nichole L.K, Horz K.F. *Morphology of meteoroid and debris impact craters formed in soft metal targets on the LDEF satellite.* *International Journal of Impact Engineering*, 1995, vol. 16, no. 3, pp. 405–418. Available at: http://www.eas.uccs.edu/~tlilly/SPCE_5065_13Su/R06/Love%20-%20Morphology%20of%20meteoroid%20and%20debris%20impact%20craters%20formed%20in%20soft%20metal%20targets%20on%20the%20LDEF%20satellite.pdf (accessed 29.11.2015).
9. Zolensky M.E., Zook H.A., Horz F., Atkinson D.R., Coombs C.R., Watts A.J., Dardano C.B., See T.H., Simon C.G., Kinard W.H. *Interim report of the meteoroid and debris special investigation group (1993).* Available at: <http://www.cs.odu.edu/~mln/ltrs-pdfs/cp3194-92-p277.pdf> (accessed 30.04.2015).
10. Bernhard R.P., Christiansen E.L., Hyde J., Crews J.L. *Hypervelocity impact damage into Space Shuttle surfaces.* *International Journal of Impact Engineering*, 1995, vol. 17, pp. 57–68. Available at: <http://www.ciar.org/ttk/mbt/papers/lakowski.2006-09/ijie-vol-17pp57-64.pdf> (accessed 29.11.2015).
11. Kalinski M.E. *Hypervelocity impact analysis of International Space Station Whipple and enhanced stuffed Whipple shields.* Monterey, California, Naval. Naval Postgraduate School Monterey, CA 93943-5000. Illinois Institute of Technology. December 2004. Available at: http://calhoun.nps.edu/bitstream/handle/10945/1233/04Dec_Kalinski.pdf?sequence=1 (accessed 14.04.2015).
12. Shannon R. *Hypervelocity impact induced disturbances on composite sandwich panel spacecraft structures. A thesis submitted in fulfilment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy. School of Aerospace, Mechanical and Manufacturing Engineering Science, Engineering and Technology Portfolio. RMIT University. July 2007.* Available at: <http://researchbank.rmit.edu.au/eserv/rmit:6801/Ryan.pdf> (accessed 29.11.2015).
13. Schafer F.K., Herrwerth M., Hiermaier S.J., Schneider E.E. *Shape effects in hypervelocity impact on semi-infinite metallic targets.* *International Journal of Impact Engineering*, 2001, no. 26, pp. 699–711. Available at: http://www.ciar.org/ttk/mbt/papers/ijie00/ijie_26_613.pdf (accessed 10.05.2015).
14. Novikov L.S. *Vozdeistvie tverdykh chastits estestvennogo i iskusstvennogo proiskhozhdeniya na kosmicheskie apparaty. Uchebnoe posobie* [The spacecraft exposure to solid particles of natural and artificial origin. Text-book]. Moscow, *Universitetskaya kniga publ.*, 2009. 104 p. Available at: <http://www.nerush.org/nerush/library/m-2013-2.pdf> (accessed 10.03.2014).
15. Dobritsa D.B. *K voprosu rascheta stoikosti elementov konstruktzii kosmicheskogo apparata pri vozdeistvii chastits kosmicheskogo musora* [To the question of calculating the structural elements resistance of spacecraft on exposure to space debris]. *Vestnik NPO im. S.A. Lavochkina*, 2012, no. 5(16), pp. 53–58.
16. *Inzhenernyi spravochnik po kosmicheskoi tekhnike* [Engineer's handbook of space technology]. Ed. Solodov A.V. Moscow, *Voenizdat publ.*, 1977. 430 p.
17. Bobkov V.N., Vasil'ev V.V., Demchenko E.K., Lebedev G.V., Ovsyannikov V.A., Raushenbakh B.V., Surguchev O.V., Timchenko V.A., Feoktistov K.P., Frumkin Yu.M., Chernyaev B.V. *Kosmicheskie apparaty* [Spacecraft]. Ed. Feoktistov K.P. Moscow, *Voenizdat publ.*, 1983. 319 p. Available at: <http://kmapp.narod.ru/st006.htm> (accessed 19.01.2014).

18. Christiansen E.L. *MMOD Protection Lead NASA Johnson Space Center Houston, TX 77058. Handbook for Designing MMOD Protection. NASA Johnson Space Center, NASA/TM-2009-214785. June 2009. Available at: <http://ston.jsc.nasa.gov/collections/TRS/techrep/TM-2009-214785.pdf> (accessed 28.11.2015).*

19. *Meteoroid and debris models. ESA requirements and standards division. ESTEC, P.O. Box 299, 2200. AG Noordwijk, the Netherlands. The ECSS document ECSS-E-ST-10-04C, 15 November 2008. Available at: <https://www.spenvis.oma.be/help/background/metdeb/metdeb.html> (accessed 28.11.2015).*

20. Iyer K.A., Mehoke D.S. *Interplanetary dust particle shielding capability of spacecraft multilayer insulation. Journal of spacecraft and rockets, March–April 2015, vol. 52, no. 2, pp. 584–594. Available at: [http://www2.esm.vt.edu/~rbatra/pdfpapers/spacecraft\(584-594\)2015.pdf](http://www2.esm.vt.edu/~rbatra/pdfpapers/spacecraft(584-594)2015.pdf) (accessed 18.06.2015).*

21. Christiansen E.L. *Meteoroid/debris shielding. NASA Johnson Space Center Houston, Texas. August 2003. TP-2003-210788. Available at: http://ston.jsc.nasa.gov/collections/TRS/_techrep/TP-2003-210788.pdf (accessed 28.11.2015).*

22. Christiansen E.L. *Design and performance equations for advanced meteoroid and debris shields. International Journal of Impact Engineering, 1993, vol. 14, pp. 145–156. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/journal/0734743X/14/1> (accessed 18.06.2015).*