

АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ИНЕРЦИАЛЬНОГО ВЗРЫВА В ЗАДАЧАХ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ УДАРОВ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЕНЕТРАТОРОВ В ИССЛЕДУЕМОЕ НЕБЕСНОЕ ТЕЛО И МЕТЕОРНО-ТЕХНОГЕННЫХ ЧАСТИЦ В ЭЛЕМЕНТЫ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Е. В. Леун, Д. Б. Добрица, А. А. Поляков, В. К. Сысоев

АО «НПО Лавочкина», Россия, 141402,
г. Химки, Московская область, ул. Ленинградская, 24

В статье рассматриваются особенности возникновения инерциального взрыва (ИВ) в задачах высокоскоростных ударов о твердую преграду ударников двух типов: металлических пенетраторов в исследуемое небесное тело для космических контактных научных исследований и метеорно-техногенных частиц в элементы космических аппаратов.

Анализируются особенности ИВ, условия его возникновения и результаты теоретических и экспериментальных исследований. Обсуждается отношение расчетной скорости удара, приводящей к появлению ИВ, к скорости звука в разных металлах, стремящихся к определенному среднему значению. Обсуждается влияние контактно- и термоэлектрических явлений и температуры ударника на возникновение ИВ, а также его зависимость от площади сечения ударника. Рассматриваются способы предотвращения возникновения ИВ.

Ключевые слова: космические исследования, небесное тело, пенетратор, высокоскоростной удар, перегрузка, критическая скорость, электронная эмиссия, инерциальный взрыв, метеорно-техногенные частицы.

Введение

В АО «НПО Лавочкина» в течение длительного времени активно ведутся работы в двух важных направлениях. Первое связано с исследованием и проектированием пенетраторов — малых космических аппаратов (КА) для контактных космических исследований небесных тел [1–5]. Один из последних подобных проектов был связан с созданием пенетратора для миссии «Марс-96».

Во втором направлении совершенствуются способы защиты элементов КА от воздействия метеорно-техногенных частиц [6, 7].

Центральным вопросом обоих направлений является высокоскоростное воздействие ударника на преграду [8, 9]. Для металлического ударника критичным является вероятность возникновения от большой ударной перегрузки т.н. инерциального взрыва (ИВ), сопровождаемого световой вспышкой (возможно плазмой), выбросом газопаровой смеси расплава металла и его осколков, электромагнитным импульсом [10–14].

Однако большинство из них имеют как минимум два противоречия. Во-первых, почти все эксперименты по исследованию особенностей ИВ проведены в земных условиях при скоростях удара $v_{уд}$, превышающих расчетное значение скорости ИВ $v_{ин}$. Во-вторых, высокоскоростные удары метеорно-техногенных частиц по элементам КА в космических условиях при низких температурах приводят к ИВ при существенно больших скоростях, начиная с 10 км/с и до 20–25 км/с.

Понимание причин этого с единых позиций позволит этим двум направлениям корректнее опи-

сывать природу ИВ, взаимно дополняя друг друга и используя поток метеорно-техногенных частиц как «живую космическую лабораторию». Существующие публикации не позволяют преодолеть эти противоречия, и данная статья направлена на их устранение.

Постановка задачи

В связи с этим для данной работы основными можно считать следующие задачи:

- 1) выявление причин превышения фактических скоростей удара, приводящих к ИВ $v_{ин}$ в земных и космических условиях над их расчетными значениями;
- 2) способы уменьшения вероятности возникновения ИВ.

Теория

В этом разделе рассматриваются особенности и условия возникновения ИВ для решения поставленных задач.

1. Анализ особенностей ИВ и условий его возникновения.

Ранее было показана связь между перегрузкой $G_{ин}$, возникающей при ударном внедрении, приводящей к возникновению ИВ, и критической скоростью $v_{кр}$, определенной теоретически [4]:

$$G_{ин} = \frac{a}{g} = \frac{v_{кр}^2}{2gl_{кр}}, \quad (1)$$

где a — ускорение равнозамедленного движения пенетратора при его ударном внедрении, $v_{кр}$ — критическая скорость, $l_{кр}$ — глубина кратера.

В работах [10–13] обосновывается связь между критической скоростью $v_{кр}$ и параметрами кристаллической решетки металла ударника эмпирической формулой:

$$v_{кр} = \sqrt{\frac{2ef\epsilon}{m_p \cdot A}}, \quad (2)$$

где $m_p = 1,67 \cdot 10^{-27}$ кг — масса протона; A — атомная масса металла наконечника; $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл — заряд электрона, используемый для перевода единицы энергии из джоулей (Дж) в электронвольты (эВ), ϵ — энергия металлической связи материала наконечника пенетратора, эВ·атом⁻¹, f — коэффициент эффективности удара, отражающий вероятность возникновения ИВ, определяемый экспериментально, находящийся, как правило, в диапазоне $0,75 < f < 1$.

1.1. Связь между критической скоростью $v_{кр}$ и скоростью звука $v_{зв}$.

Рассмотрим отношение критической скорости $v_{кр}$ к скорости звука $v_{зв}$, который можно назвать скоростным коэффициентом $N_{ск}$

$$N_{ск} = \frac{v_{кр}}{v_{зв}} = \sqrt{\frac{2f \cdot 10^8 \cdot \epsilon}{v_{зв}^2 \cdot A}}. \quad (3)$$

Скорость звука $v_{зв}$ зависит от плотности вещества $\rho = m/V$ и его упругости

$$v_{зв} = \sqrt{\frac{k_{унр}}{\rho}}, \quad (4)$$

где $k_{унр}$ — модуль линейной упругости (модуль Юнга).

Тогда уравнение для скоростного коэффициента $N_{ск}$ можно переписать к виду:

$$N_{ск} = \sqrt{\frac{2f \cdot 10^8 \cdot \epsilon \cdot \rho}{k_{унр} \cdot A}}. \quad (5)$$

В табл. 1 представлены значения $v_{зв}$ и $v_{кр}$, с помощью которых построены соответствующие графики на рис. 1. Также в ней сведены рассчитанные по формуле (3) значения $N_{ск}$ для двадцати разных металлов, а на рис. 2 приведен его график. Как видно из этих данных, среднее значение $N_{ск}$ составило 0,45, изменяясь от 0,26 для цинка до $\approx 0,87$ для индия.

Таблица 1. Физико-технические характеристики металлов, определяющие параметры высокоскоростного удара
Table 1. Physical and technical characteristics of pure metals and their alloys that determine the parameters of the high-speed impact of the penetrator when the celestial body is embedded in the ground

№	Металл	Критическая скорость $v_{кр1}$, м/с	Скорость звука в продольном стержне ¹ $v_{зв}$, м/с	Отношение $v_{кр1}/v_{зв}$
1	Цезий	558	970	0,58
2	Свинец	702	1200	0,59
3	Висмут	717	1790	0,40
4	Кадмий	718	2400	0,30
5	Барий	823	1620	0,51
6	Цинк	1006	3810	0,26
7	Индий	1063	1215	0,87
8	Уран	1066	3155	0,34
9	Олово	1145	2730	0,42
10	Тантал	1495	3350	0,45
11	Вольфрам	1535	4310	0,36
12	Медь	1660	4700	0,35
13	Цирконий	1863	3800	0,49
14	Молибден	1883	6190	0,30
15	Никель	1944	4785	0,41
16	Железо	1960	5170	0,38
17	Ниобий	2004	3480	0,58
18	Титан	2249	4140	0,54
19	Алюминий	2487	5080	0,49
20	Бериллий	4301	12890	0,33
Среднее арифметическое				0,45

Примечание: ¹Из всех данных выбиралась скорость звука в продольном стержне, в противном случае — скорость звука в металле.

Note: ¹From all the data, the speed of sound in the longitudinal rod is chosen, otherwise, the speed of sound in the metal.

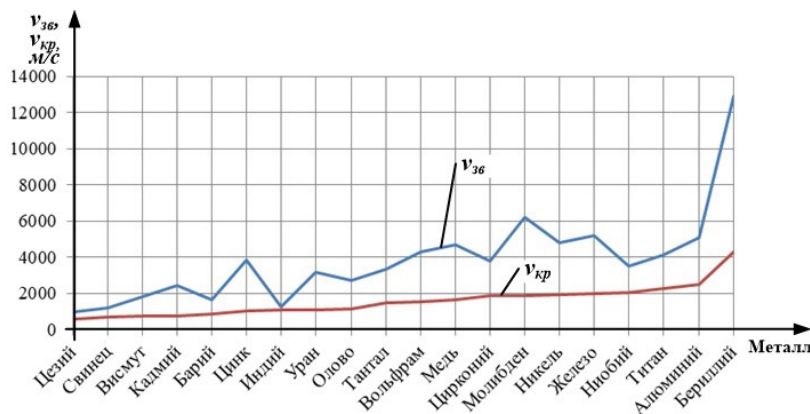


Рис. 1. Графики критической скорости $v_{кр}$ и скорости звука $v_{зв}$ в металлах
 Fig. 1. Graphs of critical velocity $v_{кр}$ and sound velocity $v_{зв}$ in metals

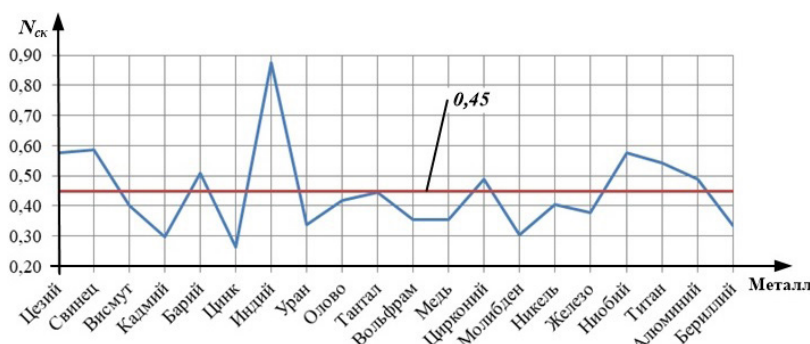


Рис. 2. График значения скоростного коэффициента $N_{ск}$ для разных металлов
 Fig. 2. Graph of the value of the speed coefficient of $N_{сп}$ for different metals

2. Влияние электротепловых явлений на возникновение ИВ.

В разделе рассмотрены условия возникновения ИВ с учетом электрических, тепловых и механических параметров контакта ударник-преграда.

2.1. Инерциально-электронная эмиссия, возникающая при ИВ, и её особенности.

При высокоскоростном ударе в металлическом ударнике появляется сторонняя сила инерции неэлектрического происхождения, создающая условия для перетекания к его передней части электронов, их проскальзывания относительно ионного остова металлической решетки и выхода за ее пределы, приводя к появлению электронной эмиссии. Так возникает электрическое поле с напряженностью $E_{ув}$ [14]:

$$E_{ув} = \frac{m \cdot a}{e} = \frac{A \cdot m_p \cdot a}{e} \approx 10^{-8} \cdot A \cdot a, \quad (6)$$

где A — атомная масса металла, $m_p = 1,67 \cdot 10^{-27}$ кг — масса протона; $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл — заряд электрона; a — ускорение проскальзывания.

Это эквивалентно подключению в момент удара к концам ударника генератора с подачей импульсного сигнала амплитудой $U_{ув}$

$$U_{ув} = E_{ув} \cdot l_{уг} \approx 10^{-8} \cdot A \cdot a \cdot l_{уг}, \quad (7)$$

где $l_{уг}$ — длина ударника.

Например, как следует из [13], для свинцового снаряда длиной 0,025 м и ускорения $a = 6,8 \cdot 10^7$ м/с² напряженность составила $E_{ув} =$

$= 140,8$ В/м, откуда амплитуда сигнала равна $U_{ув} = 140,8 \cdot 0,025 = 3,52$ В.

2.2. Возникновение ИВ металлов от инерциально-электронной эмиссии. Известны разные способы передачи энергии электронам в металле, достаточной для их выхода из металла, например: 1) термоэлектронная эмиссия; 2) фотоэлектронная эмиссия (внешний фотоэффект); 3) вторичная электронная эмиссия, возникающая при бомбардировке металла атомами, ионами, электронами; 4) взрывная эмиссия (пробой вакуумного промежутка с сильно заостренным катодом, когда при резком возрастании тока кончик острия взрывается с последующим выбросом из него плазменного сгустка). В некоторых процессах, например, в сварочных дугах, могут быть реализованы процессы, промежуточные между термо- и автоэлектронной эмиссией.

Для рассматриваемого ударного высокоскоростного внедрения металлического ударника имеет место, вероятно, еще один вид эмиссии — инерциально-электронная эмиссия, которая при высоких скоростях удара содержит взрыв и по физической сути близка и/или родственна взрывной электронной эмиссии [15–17]. В ее основе лежит физический процесс выбивания подвижных инерционных заряженных частиц — электронов за счет резкого торможения (или удара, подобного идеальной функции Хэвисайда $1(t)$) движущегося тела металла подобно тому, как до сих пор часто стирают в Индии выбиванием грязи из белья (рис. 3а, б) [18]. При высокоскоростном ударе движущегося тела с большой перегрузкой G накопленная кинетическая энергия электронов от инерции движения превышает работу их выхода из металла, формируя импульсный инерциально-эмиссионный ток. Критическое число



a)



б)

Рис. 3. Стирка в Индии методом выбивания грязи из белья

(а, б — резкое торможение быстродвижущегося тела с вылетанием инерционных частиц), взято из [18]

Fig. 3. Washing in India by knocking dirt out of laundry (a, b — sudden braking of a fast-moving body with the departure of inertial particles), taken from [18]

вышедших электронов и опустошение кристаллической решетки металла одновременно с локальным разогревом приводят к возникновению ИВ.

В [4] было получено уравнение, связывающее перегрузку ИВ $G_{ув}$ и инерциально-эмиссионный ток ИВ $I_{ув}$ при возникновении ИВ, из которого можно получить обратную зависимость, имеющую линейный характер:

$$I_{ув} = \frac{G_{ув} \cdot g}{k_{э\lambda}} \sqrt{\frac{2m_p \cdot A \cdot e}{f \cdot \varepsilon}} = \alpha_{ув} \cdot G_{ув}, \quad (8)$$

где $\alpha_{ув} = \frac{g}{k_{э\lambda}} \sqrt{\frac{2m_p \cdot A \cdot e}{f \cdot \varepsilon}}$ — инерциальный коэффициент.

Для экспериментов по исследованию импульса инерциально-эмиссионного тока $I_{ув}$, возникающего в свинцовой пуле при ударе о титановую преграду при $n < 1$, т.е. без возникновения ИВ в [11], был разработан быстродействующий датчик в виде т.н. пояса Роговского, устройство и работа которого описаны далее.

2.3. Влияние контактно- и термоэлектрических явлений на возникновение ИВ.

В расчетах по ИВ [10–13] за основу взяты собственные параметры металла ударника. Однако правильнее рассматривать свойства образующегося контакта ударник-преграда, наиболее важным из которых представляется соединение металл-металл ($Me_{yg}-Me_{np}$). Так, основным материалом КА являются алюминий и его сплавы, а судя по составу метеоритов, считающихся осколками астероидов, они могут быть железными, железнокаменными и каменными. Железные метеориты [10] состоят из сплава камасит со средним содержанием по массе: 89,7 % — Fe; 9,1 % — Ni; 0,62 % — Co. Но и в состав каменных метеоритов входит не менее 20...25 % сплава Fe-Ni.

Контакт $Me_{yg}-Me_{np}$ влияет на дополнительные свойства, определяемые контактно- и термоэлектрическими явлениями, возникающими в непо-

средственной близости от поверхностей ударника и преграды. Тогда описание всего процесса для высокоскоростного удара металлического ударника Me_{yg} в металлическую преграду Me_{np} может быть следующим. Допустим, перед ударом металлические ударник Me_{yg} и преграда Me_{np} имеют начальную температуру T_0 . В начале удара поверхность металлического ударника соединяется с поверхностью металлической преграды, разогреваясь от высокоскоростного удара на $\Delta T_{всу}$ и формируя на контакте $Me_{yg}-Me_{np}$ начальную разность потенциалов. Упрощенно считая, что часть η кинетической энергии ударника $E_{yg} = \frac{m_{yg} v_{yg}^2}{2}$ расходуется на нагрев $\Delta T_{всу}$ поверхностного слоя его носа, можно записать:

$$\frac{\eta \cdot m_{yg} v_{yg}^2}{2} = C m_{yg} \Delta T_{всу}, \quad (9)$$

где C — теплоемкость металла ударника.

С учетом этого можно получить искомый нагрев $\Delta T_{всу}$

$$\Delta T_{всу} = \frac{\eta \cdot v_{yg}^2}{2C} \quad (10)$$

Для электрического контакта двух разных металлов $Me_{yg}-Me_{np}$, формируемые знаки потенциалов определяются известным электрохимическим рядом напряжений (ряд Вольты): Li→Rb→K→Ba→Sr→Ca→Na→Mg→Al→Mn→Zn→Cr→Fe→Cd→Co→Ni→Sn→Pb→H→Sb→Bi→Cu→Hg→Ag→Pd→Pt→Au. При их контакте металл, стоящий впереди в этом ряду, приобретает положительный заряд, а другой — отрицательный. В соответствии с этим при электрическом контакте свинцового (Pb) ударника и стальной (железо, Fe) преграды, наиболее исследованного в [12], у первого будет отрицательный заряд, а у второго — положительный.

Для электрического контакта свинец-железо (Pb-Fe) инерциально-эмиссионный электрический

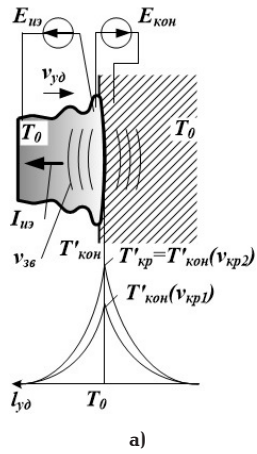


Рис. 4. Инерциальный взрыв: схема, поясняющая условия его возникновения (а), фото фронта свечения и взрывной волны с выбросом газо-паровой смеси (б, в) [11]

Fig. 4. Inertial explosion: a diagram explaining the conditions of its occurrence (a), a photo of the glow front and an explosive wave with the emission of a gas-vapor mixture (b, c) [11]

ток $I_{ув}$ в виде движения положительных частиц (дырок) противоположен внутреннему контактному полю. В соответствии с эффектом Пельтье это приводит к дополнительному нагреву контакта $\Delta T_{пел}$

$$\Delta T_{пел} = k_{пел} I_{ув} \Delta t, \quad (11)$$

где $k_{пел}$ и $I_{ув}$ — коэффициент Пельтье и сила инерциально-эмиссионного тока для данного контакта, Δt — время.

Кроме того, от торможения формирующийся в ударнике инерциально-эмиссионный ток $I_{из}$, протекающий через контакт $Me-Me_{np}$, разогревает ударник и контакт джоулевым теплом $\Delta T_{гж} \approx I_{из}^2 R_{уг}$. Плотность этого тока $I_{из}$ максимальна в приповерхностных слоях контакта, уменьшается по мере удаления в обе стороны от него.

Температура контакта снижается от эффекта Томсона на $\Delta T_{том}$ и на $\Delta T_{зв}$ воздействием на него звуковых волн, убегающих в разные стороны от контакта со скоростью $v_{зв}$.

Эффект Томсона основан на диффузии электронов от горячего конца к холодному. Знак явления индивидуален для каждого из всех металлов, но для данного общего описания примем его отрицательным.

С учетом вышесказанного, температуру контакта можно записать уравнением:

$$T_{кон} = T_0 + \Delta T_{всу} + \Delta T_{гж} + \Delta T_{пел} - \Delta T_{том} - \Delta T_{зв}. \quad (12)$$

Так, в приповерхностном слое ударника вокруг контакта возникает зона с критическим сочетанием максимального нагрева его опустевшей кристаллической решетки, т.е. максимальной температуры контакта $T_{кон}$ (рис. 4а) и минимальной концентраций электронов $N'_{кон}$: $T_{кон} - N'_{кон}$. Примерно в пределах этой зоны и формируется ИВ со свечением и выбросом потока газопаровой смеси расплава металла, отбрасывающих с огромной силой осколки и остатки ударника (рис. 4б).

Как показано выше, разбегающиеся в разные стороны от контакта по объемам ударника и преграды звуковые волны со скоростью $v_{зв}$ разносят, распределяют часть тепловой энергии по объему ударника с помощью подвижных электронов. Вектора движения звука $v_{зв}$ и ударника $v_{уг}$ разнона-

правлены, формируя для них относительную (разностную) скорость Δv_p :

$$\Delta v_p = v_{зв} - v_{уг}. \quad (13)$$

Как следует из [14], время ИВ металла $t_{ув}$ обычно не превышает $10^{-6} \dots 10^{-5}$ с, и размеры зоны ИВ $l_{ув}$ рассчитывают по формуле

$$l_{ув} = \Delta v_p \cdot t_{ув} = (v_{зв} - v_{уг}) \cdot t_{ув} \quad (14)$$

с соответствующими значениями $T'_{кон}$ и $N'_{кон}$, рассчитанными по зоне ИВ $l_{ув}$:

для удельной температуры

$$T'_{кон} = \frac{T_{кон}}{l_{ув}} = \frac{T_{кон}}{(v_{зв} - v_{уг}) t_{ув}}, \quad (15)$$

и для удельной концентрации электронов

$$N'_{кон} = \frac{N_{кон}}{l_{ув}} = \frac{N_{кон}}{(v_{зв} - v_{уг}) t_{ув}}. \quad (16)$$

Поэтому при скоростях удара $v_{уг}$ намного меньших, чем скорость звука $v_{зв}$, например, при $v_{кр1}$, знаменатель формул (15) и (16) большой, а средние по зоне контакта температура $T'_{кон}(v_{кр1})$ и концентрация электронов $N'_{кон}$ имеют малые значения. Но с приближением $v_{уг}$ к скорости звука $v_{зв}$ их разность стремится к нулю $(v_{зв} - v_{уг}) \rightarrow 0$, а значения $T'_{кон}$ и $N'_{кон}$ возрастают, достигая при $v_{кр2}$ критического значения $T'_{кон}(v_{кр2}) = T'_{кр}$ и приводя к возникновению ИВ (рис. 4а–в). И именно этим можно объяснить близость экспериментально подтвержденной скорости удара, вызывающей возникновение ИВ к скорости звука $v_{зв}$ при сопоставимой твердости ударника и преграды. Так, для свинца скорость звука $v_{зв} \approx 1200$ м/с, а экспериментально подтвержденная скорость возникновения ИВ достигала $v_{уг} \approx 1130$ м/с [12] и максимальная толщина слоя, охваченного ИВ, равна $l_{ув} = (1200 - 1130) \cdot 10^{-5} = 700$ мкм.

2.4. Уточнение условий возникновения ИВ.

Как показано выше, теоретический расчет критической скорости $v_{кр}$ по формуле (2) не совсем

соответствует экспериментальным исследованиям. Поэтому можно использовать значения $v_{кр}$ в качестве референтных, анализируя последствия кратных скоростей удара v_{yg} , согласно выражению:

$$\frac{v_{yg}}{v_{кр}} = n. \quad (17)$$

При выполнении условия $n < 1$ не возникает ИВ, но его удобно использовать для экспериментального изучения особенностей протекания возникающего электрического тока, результаты которых обсуждаются далее.

Для двух других условий $n \approx 1$ и $n > 1$ вводятся первая $v_{кр1}$ и вторая $v_{кр2}$ критические скорости, рассмотренные далее.

2.4.1. Первая критическая скорость.

Выполнение условия $n \approx 1$ соответствует первой критической скорости $v_{кр1}$, определенной теоретически по эмпирической формуле (2), недостатком которой является игнорирование размерных параметров ударника, а также механических и электрических параметров преграды. Поэтому можно предположить, что возникновение ИВ при первой критической скорости $v_{кр1}$ возможно только лишь для идеального ударника с бесконечно малой толщиной.

2.4.2. Вторая критическая скорость.

Примем, что значение второй критической скорости $v_{кр2}$ обуславливает возникновение ИВ, подтвержденное экспериментально. Для удобства прогностических расчетов значения $v_{кр2}$ предлагается ввести специальный параметр — индивидуальная для каждого металла удельная энергия по длине E_{yg1} в Дж/м, как отношение кинетической энергии ударника $E_{кин}$ к его длине l_{yg} :

$$E_{yg1} = \frac{E_{кин}}{l_{yg}} = \frac{m_{yg} v_{yg}^2}{2l_{yg}}. \quad (18)$$

В соответствии с формулой (18) и результатами экспериментов, представленных в [11], для цилиндрического свинцового ударника длиной $l_{yg} = 15,2 \cdot 10^{-3}$ м и массой 27 г ударяющего по свинцовой преграде со скоростью 1130 м/с, значение удельной энергии по длине E_{yg1} определится расчетом:

$$E_{yg1} = \frac{m_{yg} v_{кр2}^2}{2l_{yg}} = \frac{27 \cdot 10^{-3} \cdot 1130^2}{2 \cdot 15,2 \cdot 10^{-3}} \approx 1,1 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{м}}. \quad (19)$$

Полученное значение можно принять пороговым, вызывающим критическое сочетание контакт $Me_{yg} - Me_{пр}$, приводящее к возникновению ИВ. Оно используется в качестве опорного для расчета второй критической скорости $v_{кр2}$, которую можно определить по формуле:

$$v_{кр2} = k_{yg} \sqrt{\frac{2l_{yg} \cdot E_{yg1}}{m_{yg}}} = k_{yg} \sqrt{\frac{2l_{yg} \cdot E_{yg1}}{\rho_{yg} \cdot S_{yg} l_{yg}}}, \quad (20)$$

где ρ_{yg} и S_{yg} — плотность и сечение ударника.

Дальнейшее преобразование формулы зависит от формы сечения. Например, для круглого сечения имеем $\frac{\pi d_{yg}^2}{4} \approx 0,785 \cdot d_{yg}^2$, где d_{yg} — диаметр ударника, а для сечений с формами равностороннего тре-

угольника, квадрата и правильного шестиугольника площади равны $\frac{\sqrt{3}}{4} l_{cm}^2$, l_{cm}^2 , $\frac{3\sqrt{3}}{42} l_{cm}^2$ соответственно, где l_{cm} — длина стороны фигуры сечения ударника. И для самого распространенного круглого сечения получаем

$$\begin{aligned} v_{кр2} &= k_{yg} \sqrt{\frac{2l_{yg} \cdot E_{yg1}}{\rho_{yg} \cdot S_{yg} l_{yg}}} = \\ &= k_{yg} \sqrt{\frac{2 \cdot E_{yg1}}{\rho_{yg}} \cdot \frac{1}{0,785 \cdot d_{yg}^2}} = \\ &= k_{yg} \sqrt{\frac{2,55 \cdot E_{yg1}}{\rho_{yg}} \cdot \frac{1}{d_{yg}}}, \end{aligned} \quad (21)$$

где k_{yg} — коэффициент, учитывающий температуру T , конструктивные и другие параметры ударника.

С учетом этого для свинцовой ($\rho_{св} = 11350$ кг/м³) цилиндрической частицы при $k_{yg} = 1$ можно записать:

$$v_{кр2} = \sqrt{\frac{2,55 \cdot 1,1 \cdot 10^6}{11350}} \cdot \frac{1}{d_{yg}} = 15,72 \cdot \frac{1}{d_{yg}}. \quad (22)$$

Как следует из полученной формулы, при равных исходных данных основное влияние на значение второй критической скорости $v_{кр2}$ оказывает диаметр ударника d_{yg} .

В соответствии с этим выражением на рис. 5 построена зависимость второй критической скорости $v_{кр2}$ от диаметра цилиндрического ударника d_{yg} .

Как видно, полученный результат демонстрирует более высокую близость к реальной картине, подтверждая для метеорно-техногенных частиц высокую скорость удара, приводящую к ИВ. Таким образом, предлагаемый подход является более универсальным, существенно расширяя базу экспериментальных и теоретических исследований, позволяя применить уже имеющиеся опыт и данные исследования ударов высокоскоростных частиц по КА, в т.ч. используя реальные потоки метеорно-техногенных частиц в открытом космосе, как «естественную экспериментальную площадку».

2.5. Влияние начальной температуры ударника на значение скорости возникновения ИВ.

Суммарная энергия электронов $E_{эл}$ при движении металлического ударника определяется его кинетической энергией $E_{кин}$ и энергией теплового движения $E_{мен}$:

$$E_{эл} = E_{кин} + E_{мен}. \quad (23)$$

Формирующееся при высокоскоростном ударе от направленного потока электронов электрическое поле, которое называют инерциальным полем [14], формирует сонаправленный поток электронов, часть которого в виде эмиссионного тока выходит за пределы объема металла.

При ударе часть кинетической энергии тратится на деформацию, разогрев ударника и преграды, излучение электромагнитного импульса, и формулу (23) можно переписать:

$$E_{эл} = \frac{k_{осм} m_{yg} v_{кин}^2}{2} + \frac{3k_{\sigma} T}{2}, \quad (24)$$

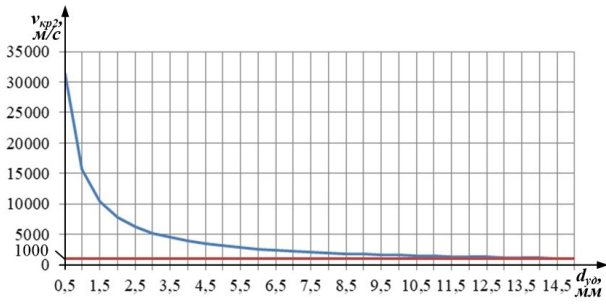


Рис. 5. График зависимости второй критической скорости $v_{кр2}$ от диаметра ударника d_{ya}
 Fig. 5. Graph of the dependence of the second critical velocity of $v_{кр2}$ on impactor's diameter d_{ya}

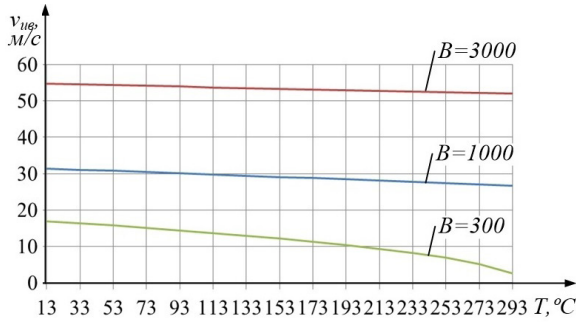


Рис. 6. График зависимости скорости возникновения ИВ $v_{ин}$ от температуры T при моделировании для трех значений коэффициента $B=300, 1000, 3000$
 Fig. 6. Graph of the dependence of the rate of occurrence of inertial explosion on the temperature T during modeling for three values of the coefficient $B = 300, 1000, 3000$

где $k_{ост}$ — остаточная доля кинетической энергии ударника, сформировавшей эмиссию электронов, $k_б$ — постоянная Больцмана, равная $1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К.

Преобразуем это выражение к следующему виду:

$$\frac{k_{ост} m_{yg} v_{кин}^2}{2} = E_{эл} - \frac{3k_б T}{2}, \quad (25)$$

откуда получаем выражение

$$v_{кин} = \sqrt{\frac{2E_{эл} - 3k_б T}{k_{ост} m_{yg}}} = k_{кин} \sqrt{2E_{эл} - 3k_б T}, \quad (26)$$

где $k_{кин} = \sqrt{\frac{1}{k_{ост} m_{yg}}}$ — «кинетический» коэффициент ударника.

Полученная функция (26) зависит от многих параметров, и для понимания особенностей характера ее изменений можно смоделировать ее зависимость для трех значений постоянного коэффициента $B=300, 1000, 3000$ на примере более простой функции

$$v_{кин} = k_{мог} \sqrt{B - T}, \quad (27)$$

($k_{мог} = 1$ м/сТ^{-1/2}), изменяя T в диапазоне от 13 до 293 с шагом 20 (по аналогии с диапазоном температур). Полученные графики функции изображены на рис. 6. и отражают отрицательные зависимости $v_{ин}$ от роста температуры ударника T .

Таким образом, повышение температуры ударника позволяет снизить скорость его удара $v_{ин}$, приводящего к ИВ. И, наоборот, снижение температуры вынуждает повысить значение $v_{ин}$. В общем, такая особенность аналогична температурным зависимостям для родственной автоэлектронной и термоэлектронной эмиссий.

С учетом того, что в уравнении (21) k_{yg} не может не зависеть от температуры T , выражение (26) можно переписать к более общему виду (для круглого сечения), принимая равенство для коэффициента пропорциональности $k_{yg} = k_{yg2} \cdot v_{кин}$:

$$\begin{aligned} v_{кр2} &= k_{yg2} v_{кин} \sqrt{\frac{2,55E_{yg1}}{\rho_{yg}}} \cdot \frac{1}{d_{yg}} = \\ &= k_{yg2} \sqrt{\frac{2E_{эл} - 3k_б T}{k_{ост} m_{yg}}} \cdot \sqrt{\frac{2,55E_{yg1}}{\rho_{yg}}} \cdot \frac{1}{d_{yg}} = \\ &= \frac{k_{yg2}}{\sqrt{k_{ост}}} \sqrt{\frac{2,55E_{yg1} (2E_{эл} - 3k_б T)}{m_{yg} \cdot \rho_{yg}}} \cdot \frac{1}{d_{yg}} = \\ &= k_{yg3} \cdot \sqrt{\frac{2,55E_{yg1} (2E_{эл} - 3k_б T)}{\rho_{yg} \cdot S_{yg} l_{yg} \cdot \rho_{yg}}} \cdot \frac{1}{d_{yg}} = \\ &= k_{yg3} \cdot \sqrt{\frac{3,25E_{yg1} (2E_{эл} - 3k_б T)}{l_{yg}}} \cdot \frac{1}{\rho_{yg} \cdot d_{yg}^2}, \quad (28) \end{aligned}$$

где $k_{yg3} = \frac{k_{yg2}}{\sqrt{k_{ост}}}$ — коэффициент пропорциональности.

Эта формула более полно отражает зависимость $v_{ин}$ и от диаметра d_{yg} , и от температуры T ударника. Она позволяет лучше понять то, что скорость удара в элементы космических аппаратов, приводящая к ИВ, мелких (размерами не более 1–3 мм) метеорно-техногенных частиц, движущихся в открытом космическом пространстве и остывших до криогенных температур, достигают значений 10–20 км/с, значительно превышая аналогичный параметр для металлических ударников диаметрами от 15 мм и выше при лабораторных условиях с $T_{окр} = 20$ °С.

3. Способы уменьшения вероятности возникновения ИВ.

Далее обсуждаются способы уменьшения вероятности возникновения ИВ.

3.1. Конструктивные способы уменьшения вероятности возникновения ИВ.

В соответствии с вышепредставленным материалом конструктивные способы уменьшения вероятности возникновения ИВ могут заключаться в следующем:

- выбор металла ударника с максимально возможной скоростью распространения звука;
- заостренная носовая часть;
- винтовая внешняя поверхность ударника подобно конической резьбе для увеличения пути и, соответственно, времени выхода электронов из металла ударника;
- охлаждение носовой части пенетратора, препятствующего вылету электронов из металла.

3.2. Электромагнитные способы уменьшения вероятности возникновения ИВ.

Исходя из преобладания электрической природы возникновения ИВ, далее представлены электромагнитные способы уменьшения его вероятности:

- использование металла добавления легирующих примесей, формирующих избыток электронов в виде примесной проводимости n -типа, по-

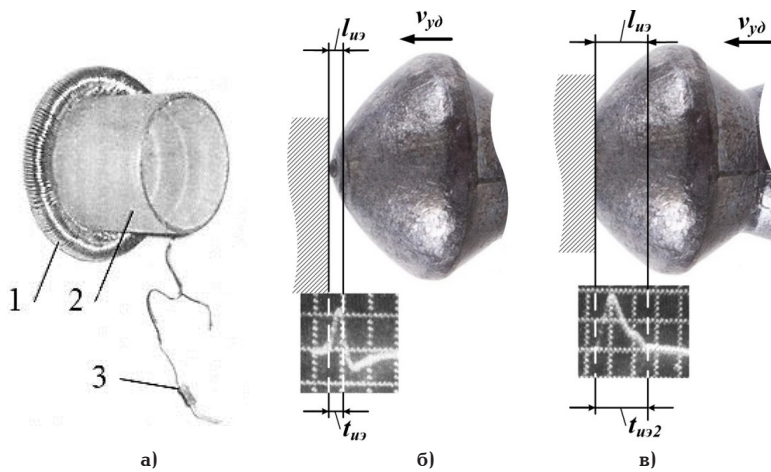


Рис. 7. Регистрация электронного импульса инерциально-эмиссионного тока $I_{из}$ поясом Роговского (а), пространственно-временные диаграммы схемы на основе осциллограмм при высокоскоростном ударе по преграде свинцовыми пулями: с острым (б) и плоским (в) носами
 Fig. 7. Registration of the electronic pulse of the inertial emission current $I_{из}$ by the Rogovsky belt (a), space-time diagrams of the circuit based on oscillograms during a high-speed impact on the barrier with lead bullets: with sharp (b) and flat (c) nose

звляющего повысить начальную концентрацию электронов Ne;

— введение в носовую часть ударника элемента из пьезоматериала, например, кварца, создающего за счет пьезоэффекта [19] при высокоскоростном ударе электрический сигнал, приводящий к уменьшению инерциально-эмиссионного тока $I_{из}$;

— выбор материала ударника, стоящего правее по электрохимическому ряду напряжений (ряд Вольты), чем потенциальный материал преграды, вызывающий при протекании инерциально-эмиссионного тока $I_{из}$ через такой контакт, согласно эффекту Пельтье, охлаждение, а не нагрев;

— использование винтовой поверхности ударника, позволяющей увеличить его собственную индуктивность, препятствующую формированию высокочастотного импульса инерциально-эмиссионного тока $I_{из}$;

— формирование емкостной части конструкции ударника, позволяющей за счет электрического поля E , охватывающего носовую часть ударника, препятствовать формированию высокочастотному импульсу инерциально-эмиссионного тока $I_{из}$. Одним из вариантов может быть создание эквивалентной схемы цилиндрического или коаксиального конденсатора с внутренней обкладкой в виде металлического ударника, а внешней — металлическое покрытие или фольга, надетая снаружи и разделенная тонким изолятором.

Результаты экспериментов

Для экспериментальной регистрации импульса инерциально-эмиссионного тока $I_{из}$, возникающего при высокоскоростном ударе, использовался вышеупомянутый пояс Роговского (рис. 7а), позволивший зарегистрировать импульсы инерциально-эмиссионного тока $I_{из}$ [11]. Он представлял собой спираль 1 из 210 витков медной проволоки с диаметрами 12 мм и 0,9 мм соответственно. Для защиты от фрагментов влетающей пули на пояс надета оправка 2 из немагнитной нержавеющей стали. Наружный диаметр оправки 55,5 мм, толщина стенки 2 мм, высота 59 мм. Индуктивность пояса составляла

$L = 1,73 \cdot 10^{-6}$ Гн. Его нагрузкой 3 служило активное сопротивление $R = 91$ Ом, напряжение с которого подавалось на вход усилителя осциллографа С8-17 по стандартному кабелю длиной 0,5 м. Входная емкость усилителя $C = 42 \cdot 10^{-9}$ Ф [11].

Выстрелы производились свинцовыми пулями «Baracuda Match» с острым (рис. 7б) и тупым (рис. 7в) носами диаметром (калибром) 4,5 мм, длиной 8 мм, массой $0,667 \cdot 10^{-3}$ кг из пневматической винтовки «GAMO-CFX». Скорость пули на выходе из ствола составляла 220–240 м/с. Мишенью был титановый диск диаметром 111 мм и массой 0,53 кг. Расстояние между срезом ствола и плоскости мишени составляло 60 мм.

На рис. 7б и 7в в показаны осциллограммы индуцированных в поясе Роговского импульсов напряжения $U(t)$ (ось ординат), в зависимости от времени t (ось абсцисс) импульса для свинцовой пули, влетающей со скоростью 234 м/с. Масштаб больших делений: по вертикали $U(t) \sim 2 \cdot 10^{-3}$ В, по горизонтали $t \sim 2 \cdot 10^{-7}$ с.

Как видно, затупление носа пули/ударника приводит к возрастанию амплитуды импульсов на 10–40 %, пропаданию отрицательного импульса сигнала и увеличению длительности сигнала с $\approx 10^{-7}$ до $\approx 4 \cdot 10^{-7}$ с. Этим подтверждается обратная зависимость между заостренностью носа ударника на амплитуду и длительность инерциально-эмиссионного тока $I_{из}$.

Обсуждение результатов

1. Для описания условий возникновения ИВ целесообразно использовать два значения критической скорости. Первая критическая скорость $v_{кр1}$ является теоретическим параметром, отражая возникновение ИВ для идеального бесконечно тонкого ударника. Вторая критическая скорость $v_{кр2}$ является комплексной и универсальной функцией, учитывая массогабаритные параметры, температуру, скорость звука материала ударника. Ее значение обратно пропорционально диаметру ударника $d_{уд}$ (при круглом сечении) и растет при уменьшении температуры T .

2. Отношение первой критической скорости к скорости звука в земных условиях для разных металлов в среднем равно 0,45, изменяясь от 0,26 для цинка до $\approx 0,87$ для индия.

3. Специальные электротехнические меры повышают постоянную времени эквивалентной цепи ударника и инерционность движения электронов, препятствуя выходу электронов за пределы ударника, уменьшая эмиссионный ток $I_{ув}$ и увеличивая вторую критическую скорость $v_{кр2}$. Это снижает вероятность возникновения ИВ.

4. Повышение остроты носа ударника снижает значение эмиссионного тока $I_{ув}$ и вероятность возникновения ИВ.

Выводы и заключение

1. Рассмотрение особенностей высокоскоростного удара о твердую преграду металлических пенетраторов в исследуемое небесное тело для космических контактных научных исследований и метеорно-техногенных частиц в элементы КА позволило подойти к созданию основ единого подхода при описании условий возникновения ИВ, связав их размерами и температурой ударника, приблизив к реальным экспериментальным данным.

2. Природу возникновения ИВ можно отнести к одному из видов электронной эмиссии, а именно, к т.н. инерциально-электронной эмиссии. В основе его лежит появление при высокоскоростном ударе контактно- и термоэлектрических явлений в зоне контакта ударник-преграда. Они основаны на нагреве и возникновении инерциально-эмиссионного тока $I_{из}$, приводящих к превышению критического уровня удельных температуры $T_{кон}$ и концентрации электронов N_e^* в зоне контакта ударник-преграда.

3. В основе способов уменьшения вероятности возникновения ИВ лежат меры по снижению уровня удельных температуры $T_{кон}$ и концентрации электронов N_e^* в зоне контакта ударник-преграда, большая часть из которых основана на электромагнитных явлениях.

Благодарности

Работа выполнена в инициативном порядке.

Авторы благодарят Завьялова С. А., к.т.н., доцента кафедры «Радиотехнические устройства и системы диагностики», директора научно-образовательного центра «НИИРП ОмГТУ» Омского государственного технического университета за консультацию по вопросам особенностей электронной эмиссии.

Библиографический список

1. Пат. 2111900 Российская Федерация, МПК В 64 G 1/00. Пенетратор для исследования поверхности небесных тел / Акулов Ю. П. № 4538462; заявл. 10.01.91; опубл. 27.05.1998.
2. Пат. 2626792 Российская Федерация, МПК В 64 G 1/00. Способ доставки полезного груза в грунт небесного тела, обеспечения исследований грунта и небесного тела и устройство его реализации (варианты) / Шалай В. В., Пичхадзе К. М., Багров А. В., Леун Е. В. [и др.]. № 2015154859; заявл. 16.05.16; опубл. 01.08.17, Бюл. № 22.
3. Bagrov A. V., Leonov V. A., Leun E. V., Polyakov A. A., Sysoev V. K. Hyperspeed Penetrator to Deliver Research Equipment to Interstellar Wanderers // AIP Conference Proceedings. 2021. Vol. 2318. 190002. DOI: 10.1063/5.0038658.

4. Леун Е. В., Поляков А. А., Заширинский С. А., Сысоев В. К., Пичхадзе К. М., Шалай В. В. Некоторые особенности ударного внедрения пенетраторов в грунт небесных тел // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2021. Т. 5, № 1. С.71–79. DOI: 10.25206/2588-0373-2021-5-1-71-79.

5. Леун Е. В., Поляков А. А., Сысоев В. К. Активное высокоскоростное отделение антенного блока от головного блока двухблочного инерциального пенетратора перед внедрением в грунт исследуемого небесного тела // Материалы XXII Науч.-техн. конф. ученых и специалистов, посвященной 60-летию полета Ю. А. Гагарина, 75-летию ракетно-космической отрасли и основания ПАО «РКК «Энергия». Королев, 2021. С. 538–540.

6. Dobritsa D. B., Pashkov S. V., Khristenko Y. F. Study of the efficiency of corrugated mesh shields for spacecraft protection against meteoroids and manmade space debris // Cosmic Research. 2020. Vol. 58, № 2. P. 105–110. DOI: 10.1134/S0010952520020021.

7. Добрица Д. Б., Яценко Б. Ю., Пашков С. В., Христенко Ю. Ф. Экспериментальное исследование стойкости гофрированных сеточных противометеорных экранов // Вестник НПО им. С. А. Лавочкина. 2021. № 1 (51). С. 24–32. DOI: 10.26162/LS.2021.51.1.004.

8. Высокоскоростной удар. Моделирование и эксперимент / Под ред. А. В. Герасимова. Томск: Изд-во НТЛ, 2016. 568 с.

9. Прикладные задачи высокоскоростного удара: сб. науч. ст. / Авт.-сост.: Ю. Н. Бухарев, В. П. Гандурин, А. И. Терешин [и др.]; под ред. Ю. Н. Бухарева. Саров: ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2011. 296 с.

10. Марахтанов М. К., Марахтанов А. М. Квантовая макрорелектроника: События макромира, объясняемые законами квантовой механики. Опыт и теория. Москва: URSS, 2014. 776 с.

11. Марахтанов М. К., Ведданов В. А., Духопельников Д. В. [и др.]. Моделирование механизма разрушения космических аппаратов в результате инерциального взрыва их металлических узлов при столкновении // Вестник Московского авиационного института. 2017. Т. 24, № 1. С.17–25.

12. Марахтанов М. К., Ведданов В. А., Духопельников Д. В. [и др.]. Экспериментальное исследование энергетических характеристик высокоскоростного взаимодействия металлического ударника с преградой // Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. Вып. 9 (21). DOI: 10.18698/2308-6033-2013-9-948.

13. Марахтанов М. К. Металл как источник энергии // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2009. № 1. С. 79–91.

14. У. Чейс [и др.]. Электрический взрыв проводника / пер. с англ. Е. Т. Антропова; под ред. А. А. Рухадзе, И. С. Шпигеля. Москва: Мир, 1965. 360 с.

15. Комарский А. А. Острофокусная взрывоэмиссионная рентгеновская трубка с комбинированными электродами: дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург, 2017. 107 с.

16. Абдуллин Э. Н. Взрывоэмиссионные источники широкоапертурных электронных пучков микросекундной длительности: дис. ... д-ра техн. наук. Томск, 2007. 229 с.

17. Тухфатуллин Т. А. Модель критической электронной эмиссии из диэлектрика, индуцированной инжекцией плотного наносекундного пучка электронов: дис. ... канд. ф.-м. наук. Томск, 2002. 123 с.

18. Большая стирка в реке Ямуна (Индия). URL: <https://tomi-aleks.tourister.ru/photoalbum/15317> (дата обращения: 14.04.2022).

19. Егоров Н. Я. Разработка методов повышения прочностных характеристик пьезокерамики на основе оптимизации ее структуры и состава: дис. ... канд. техн. наук. Ростов-на-Дону, 2004 174 с.

ЛЕУН Евгений Владимирович, кандидат технических наук, ведущий инженер АО «НПО Лавочкина», г. Химки.

SPIN-код: 6060-8056
AuthorID (РИНЦ): 367560
AuthorID (SCOPUS): 57200722184

ДОБРИЦА Дмитрий Борисович, кандидат технических наук, ведущий математик АО «НПО Лавочкина», г. Химки.

SPIN-код: 4802-1841
AuthorID (RSCI): 829318

ПОЛЯКОВ Алексей Александрович, заместитель генерального конструктора АО «НПО Лавочкина», г. Химки.

СЫСОЕВ Валентин Константинович, доктор технических наук, начальник отдела научно-исследовательских работ и перспективных исследований АО «НПО Лавочкина», г. Химки.

SPIN-код: 5673-6495,

AuthorID (РИНЦ): 565837
Адрес для переписки: stankin1999@mail.ru

Для цитирования

Леун Е. В., Добрица Д. Б., Поляков А. А., Сысоев В. К. Анализ особенностей возникновения инерциального взрыва в задачах высокоскоростных ударов металлических пенетраторов в исследуемое небесное тело и метеорно-техногенных частиц в элементы космических аппаратов // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2022. Т. 6, № 2. С. 99–110. DOI: 10.25206/2588-0373-2022-6-2-99-110.

Статья поступила в редакцию 12.04.2022 г.

© Е. В. Леун, Д. Б. Добрица, А. А. Поляков, В. К. Сысоев

THE ANALYSIS OF FEATURES OF OCCURRENCE OF INERTIAL EXPLOSION IN PROBLEMS OF HIGH-SPEED IMPACT OF METAL PENETRATORS INTO THE STUDIED CELESTIAL BODY AND METEOR-TECHNOGENIC PARTICLES INTO ELEMENTS OF SPACECRAFT

E. V. Leun, D. B. Dobriza, A. A. Poliakov, V. K. Sysoev

Lavochkin Association,
Russia, Khimki, Moscow region, Leningradskaya, St. 24, 141402

The article discusses the features of the occurrence of an inertial explosion (IE) in the problems of high-speed impacts on a solid barrier of two types of impactors: metal penetrators into the studied celestial body for space contact scientific research and meteor-technogenic particles into the elements of spacecraft.

The features of IE, the conditions of its occurrence and the results of theoretical and experimental studies are analyzed. The ratio of the calculated impact velocity, leading to the appearance of willows, to the speed of sound in different metals tending to a certain average value is discussed. The influence of contact and thermoelectric phenomena and the temperature of the impactor on the occurrence of IE, as well as its dependence on the cross-sectional area of the impactor, is discussed. The ways of preventing the occurrence of IE are considered.

Keywords: space research, celestial body, penetrator, high-speed impact, overload, critical velocity, electron emission, inertial explosion, meteor-technogenic particles.

Acknowledgments

The work is carried out on the initiative basis.

The authors thank Zavyalov S. A., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Radio Devices and Diagnostic Systems Department, Director of the Scientific and Educational Center «NIIRP OmSTU» of Omsk State Technical University for advice on the issues related to electronic emissions.

References

1. Patent 2111900 Russian Federation, IPC B64 G 1/00. Penetrator dlya issledovaniya poverkhnosti nebesnykh tel [Penetrator for the study of the surface of celestial bodies] / Akulov Yu. P. No. 4538462. (In Russ.).
2. Patent 2626792 Russian Federation, IPC B 64 G 1/00. Sposob dostavki poleznogo gruzha v grunt nebesnogo tela, obespecheniya issledovaniya grunta i nebesnogo tela i ustroystvo ego realizatsii (varianty) [Method of payload delivery to celestial body soil, provision for soil and celestial body exploration and device for its implementation (versions) / Shalai V. V., Pichkhadze K. M., Bagrov A. V., Leun E. V. [et al.]. No. 2015154859. (In Russ.).
3. Bagrov A. V., Leonov V. A., Leun E. V., Polyakov A. A., Sysoev V. K. Hyperspeed Penetrator to Deliver Research Equipment to Interstellar Wanderers // AIP Conference Proceedings. 2021. Vol. 2318. 190002. DOI: 10.1063/5.0038658. (In Engl.).
4. Leun E. V., Polyakov A. A., Zashirinsky S. A., Sysoev V. K., Pichkhadze K. M., Shalai V. V. Nekotoryye osobennosti udarnogo vnedreniya penetratorov v grunt nebesnykh tel [Some features of impact penetration of penetrators into the soil of celestial bodies] // Omskiy nauchnyy vestnik. Ser. Aviatcionno-raketnoye i energeticheskoye mashinostroyeniye. *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2021. Vol. 5, no. 1. P. 71–79. DOI: 10.25206/2588-0373-2021-5-1-71-79. (In Russ.).

5. Leun E. V., Polyakov A. A., Sysoev V. K. Aktivnoye vysokoskorostnoye otdeleniye antennogo bloka ot golovnogo bloka dvukhblochnogo inertsiyal'nogo penetratora pered vnedreniyem v grunt issleduyemogo nebesnogo tela [Active high-speed separation of the antenna unit from the head unit of the two-block inertial penetrator before the introduction of the studied celestial body into the ground] // *Materialy XXII Nauch.-tekhn. Konf. Materials of the XXII Scientific and Technical Conference*. Korolev, 2021. P. 538–540. (In Russ.).

6. Dobritsa D. B., Pashkov S. V., Khristenko Y. F. Study of the efficiency of corrugated mesh shields for spacecraft protection against meteoroids and manmade space debris // *Cosmic Research*. 2020. Vol. 58, no. 2. P. 105–110. DOI: 10.1134/S0010952520020021. (In Engl.).

7. Dobritsa D. B., Yashchenko B. Yu., Pashkov S. V., Khristenko Yu. F. Eksperimental'noye issledovaniye stoykosti gofrirovannykh setochnykh protivometeornykh ekranov [Experimental study of the resistance of corrugated mesh micrometeoroid/orbital debris shields] // *Vestnik NPO im. S. A. Lavochkina. Bulletin of NPO Lavochkin*. 2021. No. 1 (51). P. 24–32. DOI: 10.26162/LS.2021.51.1.004. (In Russ.).

8. Vysokoskorostnoy udar. Modelirovaniye i eksperiment [High-speed impact. Modeling and experiment] / Ed. by A. V. Gerasimov. Tomsk, 2016. 568 p. (In Russ.).

9. Prikladnyye zadachi vysokoskorostnogo udara: sb. nauch. st. [Applied problems of high-speed impact: collection of scientific articles] / Author-compilers: Yu. N. Bukharev, V. P. Gandurin, A. I. Tereshin [et al.]; by ed. Yu. N. Bukhareva. Sarov, 2011. 296 p. (In Russ.).

10. Marakhtanov M. K., Marakhtanov A. M. Kvantovaya makroelektronika: Sobytiya makromira, ob"yasnyayemye zakonami kvantovoy mekhaniki. Opytiteoriya [Quantum macroelectronics: Events of the macrocosm explained by the laws of quantum mechanics. Experience and theory]. Moscow, 2014. 776 p. (In Russ.).

11. Marakhtanov M. K., Veldanov V. A., Dukhopel'nikov D. V. [et al.]. Modelirovaniye mekhanizma razrusheniya kosmicheskikh apparatov v rezul'tate inertsiyal'nogo vzryva ik hmetallicheskih uzlov pri stolknovenii [Modeling a spacecraft fracture mechanism occurring as a result of its metal components inertial explosion at collision] // Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo institute. *Aerospace MAI Journal*. 2017. Vol. 24, no. 1. P. 17–25. (In Russ.).

12. Marakhtanov M. K., Veldanov V. A., Dukhopelnikov D. V. [et al.]. Eksperimental'noye issledovaniye energeticheskikh kharakteristik vysokoskorostnogo vzaimodeystviya metallicheskogo udarnika s pregradoy [Experimental study of energy characteristics of high-speed interaction of a metal striker with an obstacle] // Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii. *Engineering Journal: Science and Innovation*. 2013. Issue 9 (21). DOI: 10.18698/2308-6033-2013-9-948. (In Russ.).

13. Marakhtanov M. K. Metall kak istochnik energii [Metal as an energy source] // // Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Energetika. *News of the Russian Academy of Sciences. Energy*. 2009. No. 1. P. 79–91. (In Russ.).

14. U. Chase [et al.]. Elektricheskiy vzryv provodnika [Electric explosion of a conductor] / trans. E. T. Antropova; ed. by A. A. Rukhadze, I. S. Shpigelya. Moscow, 1965. 360 p. (In Russ.).

15. Komarsky A. A. Ostrofokusnaya vzryvoemissionnaya rentgenovskaya trubka s kombinirovannymi elektrodami [An acute-focus explosion-emission X-ray tube with combined electrodes]. Ekaterinburg, 2017. 107 p. (In Russ.).

16. Abdullin E. N. Vzryvoemissionnyye istochniki shirokoaperturnykh elektronnykh puchkov mikrosekundnoy dlitel'nosti [Explosive emission sources of wide-aperture electron beams of microsecond duration]. Tomsk, 2007. 229 p. (In Russ.).

17. Tukhfatullin T. A. Model' kriticheskoy elektronnoy emissii iz dielektrika, indutsirovannoy inzhektsiyey plotnogo nanosekundnogo puchka elektronov [A model of critical electron emission from a dielectric induced by infection of a dense nanosecond electron beam]. Tomsk, 2002, 123 p. (In Russ.).

18. Bol'shaya stirka v reke Yamuna (Indiya) [Big wash in the Yamuna River (India)]. URL: <https://tomi-aleks.tourister.ru/photoalbum/15317> (accessed: 04/14/2022). (In Russ.).

19. Egorov N. Ya. Razrabotka metodov povysheniya prochnostny kharakteristik p'yezokeramiki na osnove optimizatsii

eye struktury i sostava [Development of methods for improving the strength characteristics of piezoceramics based on optimization of its structure and composition]. Rostov-on-Don, 2004. 174 p. (In Russ.).

LEUN Evgeny Vladimirovich, Candidate of Technical Sciences, Lead Engineer, Lavochkin Association, Khimki.

SPIN-code: 6060-8056

AuthorID (RSCI): 367560

AuthorID (SCOPUS): 57200722184

DOBRIZA Dmytry Borisovich, Candidate of Technical Sciences, Lead Mathematician, Lavochkin Association, Khimki.

SPIN-code: 4802-1841

AuthorID (RSCI): 829318

POLIAKOV Alexey Alexandrovich, Deputy General Designer, Lavochkin Association, Khimki.

SYSOEV Valentin Konstantinovich, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department, Lavochkin Association, Khimki.

SPIN-code: 5673-6495,

AuthorID (RSCI): 565837

Address for correspondence: stankin1999@mail.ru

For citations

Leun E. V., Dobriza D. B., Polyakov A. A., Sysoev V. K. The analysis of features of occurrence of inertial explosion in problems of high-speed impact of metal penetrators into the studied celestial body and meteor-technogenic particles into elements of spacecraft // *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2022. Vol. 6, No. 2. P. 99–110. DOI: 10.25206/2588-0373-2022-6-2-99-110.

Received April 12, 2022.

© E. V. Leun, D. B. Dobriza, A. A. Poliakov, V. K. Sysoev