

## Об ударно-волновом разгоне материала в системе пластин с уменьшающейся акустической жесткостью

© С.В. Фёдоров, А.С. Старшикова, С.А. Люшнин

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

*Для получения высокоскоростных металлических частиц при моделировании воздействия метеороидов и осколков космического мусора на защитные экраны космических аппаратов используется ударно-волновой разгон тонких металлических пластин при их соударении с ударным элементом, ускоренным легкогазовой баллистической установкой. На переднем торце такой элемент имеет вставку из слоев с уменьшающейся снаружки акустической жесткостью. Рассмотрен эффект увеличения скорости разгоняемой ударом пластины при размещении между ней и ударным элементом промежуточной системы пластин с монотонно уменьшающимся акустическим импедансом, значения которого заключены между импедансами ударного элемента и разгоняемой пластины. На основе численного моделирования в рамках плоской одномерной задачи механики сплошных сред исследован ударно-волновой разгон алюминиевой пластины при ее непосредственном соударении с танталовым ударным элементом, а также при наличии между ними одной промежуточной пластины из меди или двух промежуточных пластин из меди и титана. Зафиксировано возрастание коэффициента увеличения скорости разгоняемой пластины по отношению к скорости ударного элемента с увеличением числа промежуточных пластин. С использованием акустического приближения получено аналитическое решение задачи о разгоне пластины при наличии между ней и ударным элементом системы из бесконечного числа бесконечно тонких пластин с непрерывно уменьшающимся акустическим импедансом.*

**Ключевые слова:** *противометеоритная защита, легкогазовая баллистическая установка, ударный элемент, система пластин, пластинка-мишень, ударно-волновой разгон, акустический импеданс*

**Введение.** Разработка и подтверждение эффективности экранной противометеоритной защиты космических аппаратов от воздействия метеороидов и осколков космического мусора является важной задачей современной космонавтики [1–4]. Ее актуальность обусловлена быстрым накоплением в околоземном космическом пространстве побочных продуктов его интенсивного освоения, называемых космическим мусором, — отработавших ступеней ракет-носителей, разгонных блоков и вышедших из строя спутников. Столкновение таких объектов между собой приводит к их разрушению с образованием большого количества мелких осколков, представляющих серьезную угрозу функционирующим на орбите космическим аппаратам [5–8]. Среди осколков космического мусора основную долю составляют частицы из алюминиевых сплавов (около 40 %).

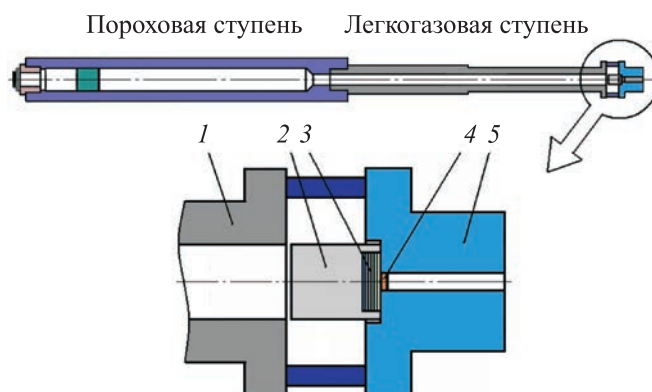
При моделировании ударного воздействия метеороидов и осколков космического мусора на защитные конструкции космических аппаратов на этапе их отработки и испытаний в наземных условиях используются различные способы получения высокоскоростных компактных металлических элементов [9, 10]. Для решения этой проблемы могут быть применены легкогазовые баллистические установки [11–14], электромагнитные ускорители различных схем [15–17], взрывные метательные устройства [18–20] и в их числе — кумулятивные заряды с «отсечкой» высокоскоростного головного участка кумулятивной струи [21–25], лазерные ускорительные системы [26].

Предметом рассмотрения настоящей работы являлся разгон пластины при ударе по ней ударным элементом, ускоренным легкогазовой баллистической установкой и имеющим на ударяющем торце вставку из слоев материалов с градиентом изменения акустического импеданса. Цель работы — выяснение особенностей ударно-волновых процессов в системе пластин с монотонно уменьшающимся акустическим импедансом при ее ударном нагружении с определением влияния числа промежуточных пластин на достигаемый эффект увеличения скорости разгоняемой концевой пластины-мишени.

**Данные экспериментов.** Скорость столкновения осколков космического мусора с космическим аппаратом может составлять до 16 км/с (удвоенная первая космическая скорость). Достижение скоростей металлических частиц такого уровня в наземных условиях возможно с использованием легкогазовых баллистических установок в сочетании на заключительном этапе ускорения с дополнительным ударно-волновым разгоном, реализуемым при ударном нагружении системы тонких пластин с подобранной определенным образом акустической жесткостью, которая зависит от плотности материала пластин и скорости звука в нем [27, 28]. В двухступенчатой легкогазовой баллистической установке сначала происходит разгон специального поршня в пороховой ступени вследствие давления газов, образовавшихся при сгорании порохового заряда [11]. Этим поршнем сжимается легкий газ (водород или гелий) в легкогазовой ступени, который после достижения в нем определенного давления, контролируемого разрывом специальной мембраны, и осуществляет разгон ударного элемента. Диаметр канала ствола на участке легкогазовой ступени существенно меньше диаметра на участке пороховой ступени. Трехступенчатые легкогазовые баллистические установки помимо пороховой ступени содержат еще две легкогазовые ступени, в которых также последовательно уменьшен диаметр канала ствола при переходе от одной ступени к другой [12].

Легкогазовые баллистические установки позволяют разгонять компактные твердые тела массой несколько десятков граммов до скоростей на уровне 7 км/с (двухступенчатые установки) и массой

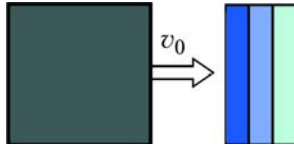
примерно 1 г — до 10 км/с (трехступенчатые установки) [11, 28]. Использование в качестве третьей ступени ускорения в двухступенчатой легкогазовой баллистической установке соударения цилиндрического ударника, разогнанного до скорости примерно 7 км/с и имеющего градиент распределения плотности на переднем торце, с тонкой пластиной (рис. 1) позволяет ускорять последнюю до скоростей на уровне удвоенной первой космической скорости ( $\approx 16$  км/с) [27, 28]. В экспериментах [27] на переднем торце ударного элемента, разгоняемого двухступенчатой легкогазовой баллистической установкой, размещался набор слоев толщиной примерно 0,3...1,0 мм из материалов с монотонно уменьшающимся акустическим импедансом  $I = \rho_0 c_0$  ( $\rho_0$  — плотность материала,  $c_0$  — скорость звука в нем) в последовательности: тантал, медь, титан, алюминий, магний, полиэтилен. В качестве мишени использовались титановые и алюминиевые пластины диаметром 6...10 мм, толщиной 0,7...1,0 мм и массой 0,07...0,34 г. В результате соударения пластины-мишени в зависимости от их размеров и массы приобретали скорость от 11,5 до 15,8 км/с. При этом коэффициент увеличения скорости (отношение скорости пластины к скорости ударного элемента) составлял от 1,64 до 2,34.



**Рис. 1.** Схема двухступенчатой легкогазовой баллистической установки с узлом ударно-волнового разгона тонкой пластины:

1 — ствол легкогазовой ступени; 2 — ударный элемент из лексана; 3 — вставка из слоев материалов с уменьшающимся кнаружи акустическим импедансом; 4 — разгоняемая пластина; 5 — вольфрамовый цилиндр

**Расчетная схема.** Рассмотренная схема ударного воздействия для разгона пластины-мишени несколько различалась с реализованной в экспериментах, изложенных в [27, 28]: в них удар по пластине производился движущейся системой слоев с градиентом акустической жесткости, размещенной на переднем торце ударного элемента, разогнанного легкогазовой баллистической установкой. Анализ



**Рис. 2.** Расчетная схема соударения ударного элемента с набором пластин

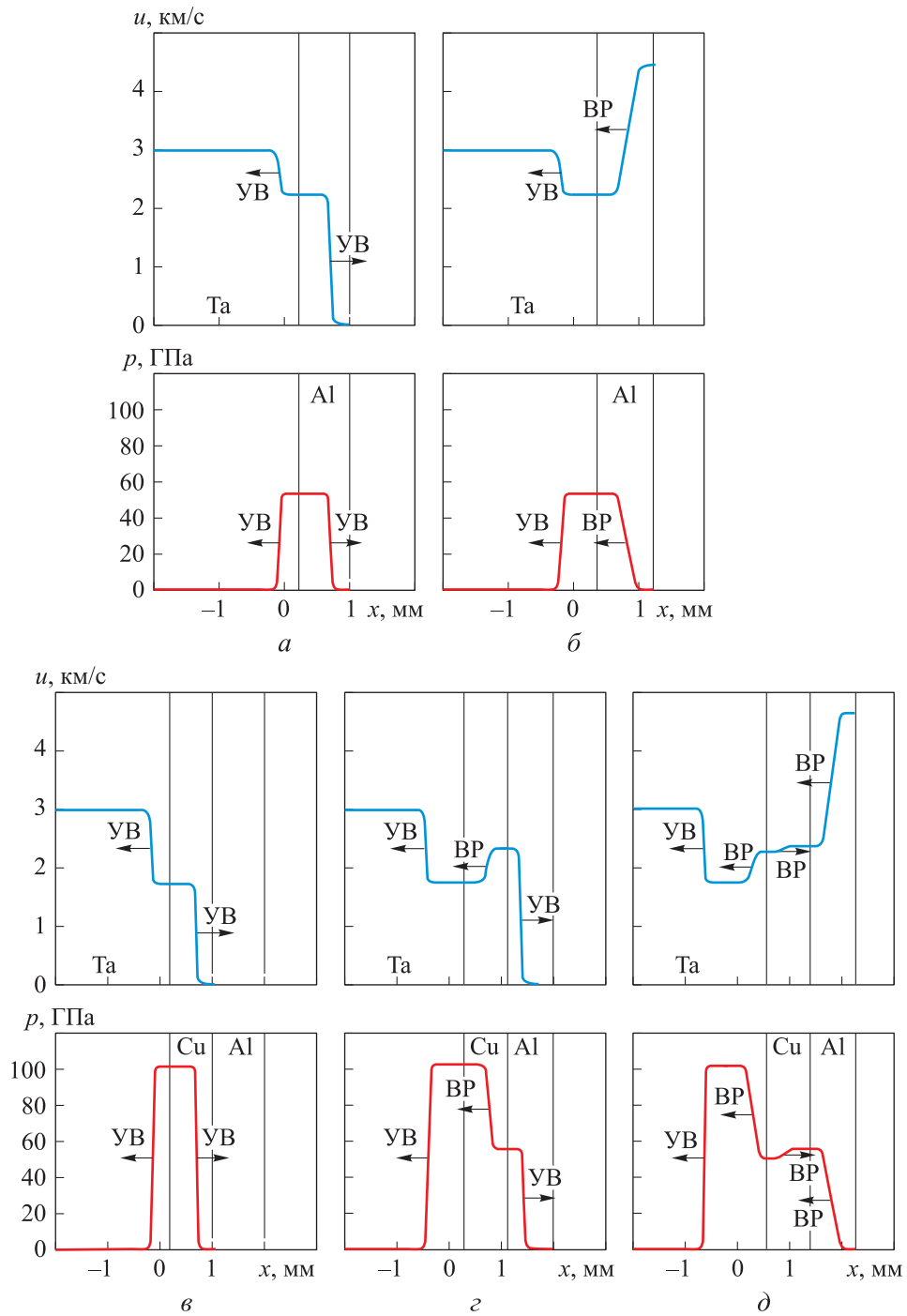
разгона пластины-мишени был проведен для схемы (рис. 2), в которой система пластин с градиентом акустической жесткости изначально покоилась так же, как и находящаяся в контакте с ней разгоняемая пластина, и по этой системе пластин со стороны, противоположной размещению разгоняемой пластины, наносился удар однородным ударным элементом из мате-

риала с высокой акустической жесткостью, превышающей жесткость пластин. При этом акустическая жесткость пластин в их системе убывала по мере удаления от торца системы, по которому наносился удар, и наименьшей она была у разгоняемой пластины.

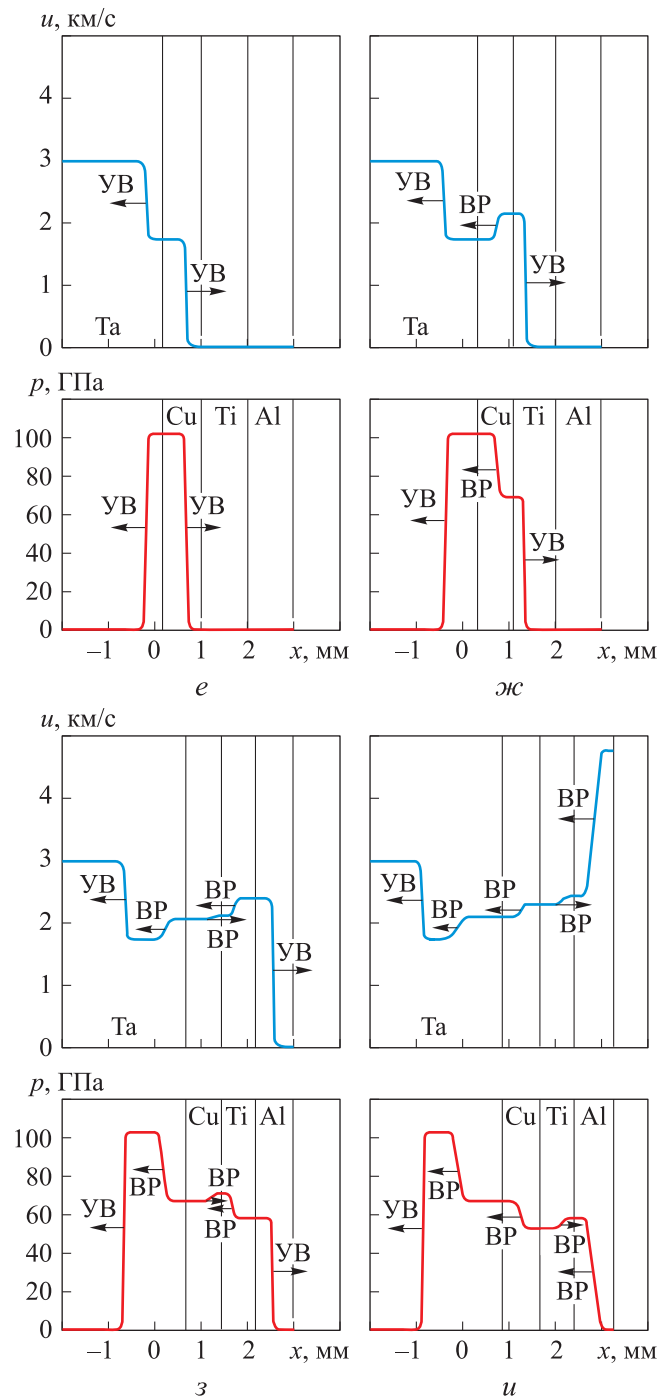
Особенности ударно-волновых процессов в описанной системе пластин (см. рис. 2) с монотонно уменьшающимся акустическим импедансом исследовались в рамках плоской одномерной задачи механики сплошных сред. Для описания поведения материалов пластин и ударного элемента использовалась модель идеальной сжимаемой жидкости с баротропным уравнением состояния в форме Тэта [18]. Задача решалась численно с применением конечно-разностного метода Уилкинса [29]. В качестве материала ударного элемента, скорость которого полагалась равной  $v_0 = 3$  км/с, рассматривался тантал ( $\rho_0 = 16\,400$  кг/м<sup>3</sup>;  $c_0 = 3450$  м/с;  $I = 56,6 \cdot 10^6$  кг/(м<sup>2</sup> · с)), а разгоняемая пластина была алюминиевой ( $\rho_0 = 2700$  кг/м<sup>3</sup>;  $c_0 = 5300$  м/с;  $I = 14,3 \cdot 10^6$  кг/(м<sup>2</sup> · с)).

Проанализированы случаи, когда танталовый ударник соударялся непосредственно с алюминиевой пластиной-мишенью, а также когда между ними размещалась одна промежуточная пластина из меди ( $\rho_0 = 8900$  кг/м<sup>3</sup>;  $c_0 = 3900$  м/с;  $I = 34,7 \cdot 10^6$  кг/(м<sup>2</sup> · с)) или две промежуточные пластины — из меди и титана ( $\rho_0 = 4500$  кг/м<sup>3</sup>;  $c_0 = 4700$  м/с;  $I = 21,2 \cdot 10^6$  кг/(м<sup>2</sup> · с)). Толщина каждой пластины принималась равной 1 мм, а продольный размер танталового ударного элемента составлял 10 мм.

**Анализ результатов расчетов.** Волновые процессы, происходящие в пластинах при ударе танталового элемента, проиллюстрированы на рис. 3 распределениями по толщине пластин в различные моменты времени массовой скорости  $u$  их материала и давления  $p$  в нем для случаев с разным количеством промежуточных пластин между разгоняемой алюминиевой пластиной и ударным элементом. Данные о массовых скоростях и давлении в пластинах (см. рис. 3) представлены в каждом случае для моментов времени, когда ударная волна, распространяющаяся по системе пластин от воздействия на нее ударного элемента, достигает примерно середины каждой очередной



**Рис. 3 (начало).** Распространение ударных волн (УВ) и волн разгрузки (ВР) при соударении танталового ударного элемента с одной пластиной из алюминия (*а, б*), с двумя пластинами — из меди и алюминия (*в–д*)



**Рис. 3 (окончание).** Распространение ударных волн (УВ) и волн разгрузки (ВР) при соударении танталового ударного элемента с тремя пластинами — из меди, титана и алюминия (e–и)

пластины, и еще одного момента, соответствующего приходу к середине разгоняемой алюминиевой пластины волны разгрузки со стороны ее свободной поверхности.

Наиболее простой вид возникающая волновая картина имеет в случае, когда танталовый элемент соударяется непосредственно с разгоняемой алюминиевой пластиной (рис. 3, *a, б*). При этом от плоскости соударения по танталовому элементу и алюминиевой пластине начинают распространяться ударные волны (см. рис. 3, *a*), а затем в результате отражения ударной волны в алюминиевой пластине от ее правой свободной поверхности по пластине распространяется волна разгрузки (см. рис. 3, *б*). В указанной волне разгрузки алюминиевая пластина приобретает свою результирующую скорость отскока от ударного элемента  $v_m$ , ровно вдвое превышающую массовую скорость материала за фронтом ударной волны, распространявшейся до этого по пластине. Отскок алюминиевой пластины от ударного элемента реализуется, когда волна разгрузки в ней достигнет контактной поверхности.

В случае размещения между разгоняемой алюминиевой пластиной и ударным элементом одной промежуточной пластины из меди (рис. 3, *в-д*) распространяющаяся по ней ударная волна от соударения с танталовым элементом (см. рис. 3, *в*) после ее выхода на границу контакта с алюминиевой пластиной порождает в последней ударную волну и волну разгрузки в медной пластине, движущуюся от границы контакта (см. рис. 3, *г*). При этом давление за фронтом ударной волны в алюминиевой пластине оказывается ниже, а массовая скорость, напротив, выше по сравнению со значениями, имевшими место в ударной волне, распространявшейся по медной пластине. После выхода ударной волны в алюминиевой пластине на ее свободную поверхность по ней начинает распространяться волна разгрузки, в которой по-прежнему происходит удвоение скорости материала алюминиевой пластины по отношению к значению скорости, приобретенной им за фронтом ударной волны (см. рис. 3, *д*). Именно это удвоившееся значение и будет иметь скорость алюминиевой пластины после ее отскока от медной, который произойдет после прихода волны разгрузки в алюминиевой пластине на границу контакта с медной. В момент движения волны разгрузки по алюминиевой пластине в медной пластине и в танталовом ударном элементе наблюдается распространение волн разгрузки от границы контакта между ними (см. рис. 3, *д*), возникших в результате прихода на эту границу волны разгрузки в медной пластине, двигавшейся в предшествующий момент от границы контакта с алюминиевой пластиной (см. рис. 3, *г*).

Волновые процессы при соударении танталового элемента с системой из трех пластин (медной, титановой и алюминиевой) иллюстрирует рис. 3, *е-и*. Распространению ударной волны по медной

пластине, сгенерированной ударом по ней танталовым элементом, соответствует рис. 3, *е*. Дойдя до границы контакта с титановой пластиной, эта ударная волна порождает ударную волну в ней и отражается обратно в медную пластину в виде волны разгрузки (см. рис. 3, *ж*). Аналогичный процесс расщепления ударной волны на ударную волну и волну разгрузки реализуется еще раз, когда ударная волна в титановой пластине достигает границы контакта с алюминиевой. В результате в последней возникает ударная волна, а в титановой пластине — волна разгрузки, движущаяся от границы контакта с алюминиевой пластиной в обратном направлении (см. рис. 3, *з*). При переходе ударной волны через обе границы контакта (медной пластины с титановой и титановой пластины с алюминиевой) происходит последовательное снижение давления при одновременном увеличении массовой скорости материала за фронтом волны. Результирующая скорость алюминиевой пластины  $v_m$ , приобретаемая ею в волне разгрузки от свободной поверхности, остается равной удвоенному значению массовой скорости материала за фронтом ударной волны, сгенерированной в алюминиевой пластине (см. рис. 3, *и*). В качестве дополнительных нюансов волновой картины, реализующейся при соударении танталового элемента с системой из трех пластин с уменьшающейся акустической жесткостью, можно отметить волны разгрузки в ударном элементе и медной пластине, распространяющиеся от их границы контакта на рис. 3, *з*: они являются следствием достижения этой границы волной разгрузки, идущей по медной пластине от границы ее контакта с титановой на рис. 3, *ж*. Следует также указать на волны разгрузки в медной и титановой пластинах, идущие от их границы контакта на рис. 3, *и*: они возникают при приходе на эту границу волны разгрузки, шедшей по титановой пластине от границы ее контакта с алюминиевой на рис. 3, *з*.

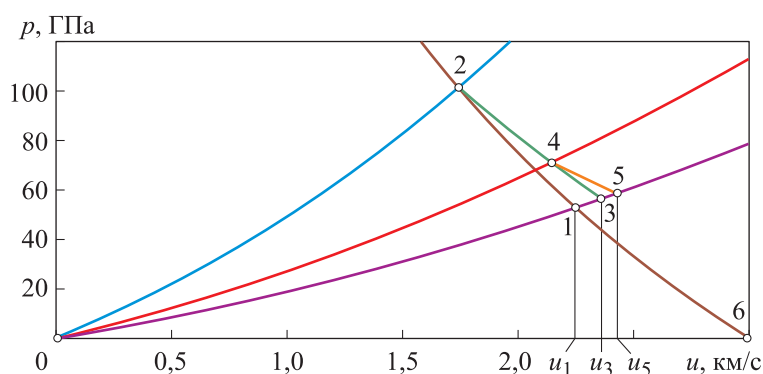
Наглядной иллюстрацией изменения параметров за фронтом ударной волны при ее движении по системе пластин с уменьшающейся акустической жесткостью является представление этого процесса на рис. 4 в координатах «давление — массовая скорость» ( $p$ — $u$ -координатах). Сжимаемость металлов невелика, для них ударные адиабаты близки к изоэнтропам, и обе эти кривые достаточно хорошо описываются баротропной зависимостью в форме Тэта [18]. С использованием законов сохранения массы и импульса на фронте ударной волны уравнение Тэта позволяет представить взаимосвязь давления и массовой скорости для ударно-волновых процессов в металлах в виде

$$u = \sqrt{\frac{p}{\rho_0} \left( 1 - \left( \frac{p}{A} + 1 \right)^{-1/n} \right)}, \quad (1)$$



где  $\rho_0$  — плотность металла в нормальных условиях;  $A, n$  — эмпирические параметры, индивидуальные для каждого металла.

На основе данной взаимосвязи  $u(p)$  и описывались ударное нагружение и разгрузка материалов ударного элемента и пластин на  $p$ — $u$ -диаграмме (см. рис. 4).



**Рис. 4.** Представление соударения танталового ударного элемента с набором пластин в  $p$ — $u$ -координатах

В случае соударения танталового элемента непосредственно с разгоняемой алюминиевой пластиной параметры ударной волны в пластине (давление и массовая скорость) даются точкой 1, являющейся точкой пересечения ударной адиабаты алюминия 0–1–3–5 с ударной адиабатой танталового элемента 6–1–2 (движущегося со скоростью  $v_0 = 3$  км/с). Ударная адиабата танталового элемента получается симметричным отображением зависимости (1) для тантала относительно вертикальной прямой, проходящей через значение скорости  $v_0/2$ . При наличии между танталовым элементом и алюминиевой пластиной одной промежуточной пластины из меди параметрам ударной волны в медной пластине отвечает точка 2, в которой ударная адиабата меди 0–2 пересекается с ударной адиабатой танталового элемента. При переходе ударной волны из медной пластины в алюминиевую в последней генерируется ударная волна с параметрами, соответствующими точке 3, являющейся точкой пересечения ударной адиабаты алюминия с изоэнтропой разгрузки медной пластины 2–4–3 (эта изоэнтропа получается симметричным отображением ударной адиабаты меди 0–2 относительно вертикальной прямой, проходящей через точку 2).

Если в систему пластин между медной и алюминиевой пластинами добавляется еще одна промежуточная пластина из титана, ударная волна, выходящая в результате из титановой пластины в алюминиевую, будет иметь параметры точки 5, в которой ударная адиабата

алюминия пересекается с изоэнтропой разгрузки титановой пластины 4–5, получаемой симметричным отображением ударной адиабаты титана 0–4 относительно вертикальной прямой, проходящей через точку 4. При этом точкой 4, лежащей на пересечении ударной адиабаты титана 0–4 с изоэнтропой разгрузки медной пластины 2–4–3, определяются параметры ударной волны, перешедшей в титановую пластину из медной. На рис. 4 четко прослеживается уже отмечавшийся выше факт, заключающийся в том, что при распространении ударной волны по системе пластин с уменьшающимся акустическим импедансом распад разрыва на границах контакта пластин приводит к уменьшению давления за фронтом ударной волны при ее переходе из одной пластины в другую с одновременным увеличением массовой скорости материала за фронтом.

Как следует из  $p$ — $u$ -диаграммы процесса (см. рис. 4), добавление между танталовым ударным элементом и разгоняемой алюминиевой пластиной дополнительных промежуточных пластин с обеспечением монотонного снижения их акустической жесткости от жесткости ударного элемента до жесткости разгоняемой пластины приводит к возрастанию параметров ударной волны (давления и массовой скорости), генерируемой в результате в разгоняемой пластине. Массовая скорость за фронтом ударной волны в разгоняемой алюминиевой пластине возрастает от значения  $u_1$  в отсутствие промежуточных пластин между ней и ударным элементом до значения  $u_3$  при наличии одной промежуточной пластины из меди и до значения  $u_5$  при наличии двух промежуточных пластин — из меди и титана. Результирующая скорость  $v_m$ , приобретаемая алюминиевой пластиной, как отмечалось выше, будет равна удвоенному значению массовой скорости за фронтом вышедшей в пластину ударной волны (т. е. удвоенным значениям  $u_1$ ,  $u_3$  или  $u_5$ ). Были получены следующие коэффициенты увеличения скорости (отношения скорости разгоняемой алюминиевой пластины к начальной скорости танталового ударного элемента): 1,48 — в отсутствие промежуточных пластин; 1,54 — при использовании одной промежуточной пластины из меди; 1,58 — при использовании двух промежуточных пластин (из меди и титана).

#### **Оценка предельных возможностей ударно-волнового разгона.**

В академическом отношении представляет интерес ответ на вопрос о том, какой предельный коэффициент увеличения скорости можно получить, если между ударным элементом с акустическим импедансом  $I_s$  и разгоняемой пластиной с меньшим значением акустического импеданса  $I_m$  располагается бесконечный набор бесконечно тонких пластин с монотонно и непрерывно уменьшающимся акустическим

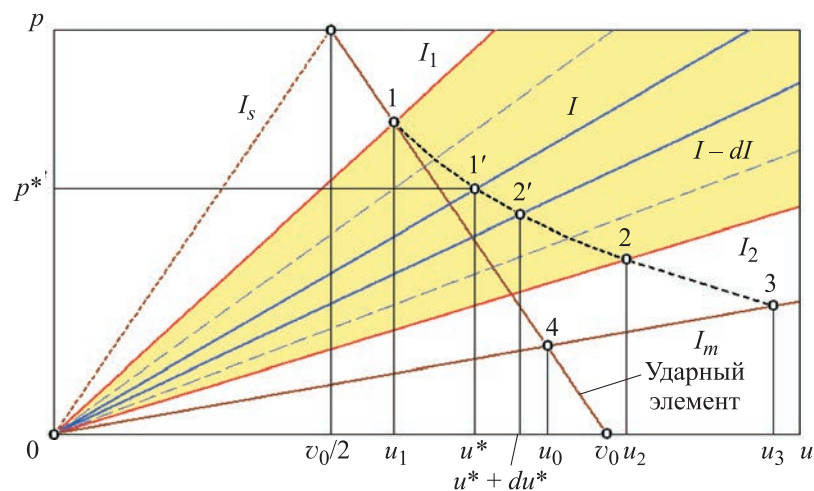
импедансом. В начальный момент времени этот набор пластин неподвижен и находится в контакте с разгоняемой пластиной с той стороны, где акустический импеданс минимален, а воздействие ударного элемента со скоростью  $v_0$  осуществляется по противоположной стороне.

Если принять упрощающие допущения, соответствующие акустическому приближению, решение сформулированной задачи можно получить в аналитическом виде. Будем предполагать, что акустический импеданс слоя из бесконечного числа бесконечно тонких пластин (в дальнейшем для краткости будем именовать его просто разгонным слоем) монотонно и непрерывно уменьшается от значения  $I_1$  на его поверхности, по которой наносится удар, до значения  $I_2$  на поверхности контакта с разгоняемой пластиной и при этом выполняются неравенства  $I_s > I_1 > I_2 > I_m$ .

В акустическом приближении взаимосвязь давления в материале с его массовой скоростью дается линейной зависимостью

$$p = Iu. \quad (2)$$

На  $p$ — $u$ -диаграмме процесса (рис. 5) точкой 1 определяются параметры ударной волны на входе в разгонный слой. Эта точка является точкой пересечения прямой (2) при значении  $I = I_1$  с прямой  $p = I_s(v_0 - u)$ , соответствующей изменению параметров в ударном элементе и получаемой симметричным отображением линейной



**Рис. 5.** Представление в акустическом приближении соударения ударного элемента с разгоняемой пластиной при размещении между ними разгонного слоя из бесконечного числа бесконечно тонких пластин с непрерывно уменьшающимся акустическим импедансом

зависимости (2) со значением  $I = I_s$  относительно вертикали, проходящей через значение скорости  $v_0/2$ . Массовая скорость материала на фронте ударной волны, входящей в разгонный слой, определяется отношением

$$u_1 = v_0 I_s / (I_s + I_1). \quad (3)$$

Для определения эволюции параметров на фронте ударной волны при ее распространении в разгонном слое рассмотрим два произвольных бесконечно близких сечения этого слоя с акустическими импедансами  $I$  и  $I - dI$  (см. рис. 5). Пусть в сечении с импедансом  $I$  параметры на фронте ударной волны имеют значения  $p^*$ ,  $u^*$ , соответствующие точке 1'. При переходе к сечению с меньшей на величину  $dI$  импедансом массовая скорость на фронте ударной волны возрастает на величину  $du^*$  и составляет  $u^* + du^*$ . Это значение скорости соответствует точке 2', лежащей на пересечении прямой  $p = (I - dI)u$  с прямой  $p = I(2u^* - u)$ , получаемой симметричным отображением линейной зависимости (2), проходящей через точку 1', относительно вертикали, проведенной через эту точку. Приравнивая правые части уравнений этих двух прямых, пересекающихся в точке 2', и заменяя в них  $u$  суммой  $u^* + du^*$ , в пренебрежении слагаемым более высокого порядка малости  $dI du^*$  и с учетом того, что приращения  $du^*$  и  $dI$  имеют разные знаки, приходим к дифференциальному уравнению с разделяющимися переменными

$$\frac{du^*}{u^*} = -\frac{1}{2} \frac{dI}{I},$$

интегрирование которого позволяет установить закон изменения массовой скорости  $u$  на фронте ударной волны в разгонном слое в зависимости от текущего значения его акустического импеданса  $I$  в виде

$$u = u_1 \sqrt{I_1 / I}. \quad (4)$$

При этом изменение давления на фронте ударной волны при ее распространении в разгонном слое в зависимости от текущего значения импеданса на основании (2), (4) будет определяться соотношением  $p = u_1 \sqrt{I_1 I}$ . Если из этого соотношения исключить переменную  $I$  с использованием (4), можно установить, что взаимосвязь давления с массовой скоростью на фронте ударной волны, распространяющейся по разгонному слою, носит гиперболический характер ( $p = u_1^2 I_1 / u$ ).

На выходе из разгонного слоя параметры на фронте ударной волны будут соответствовать параметрам точки 2 (см. рис. 5) со значением массовой скорости согласно (4):

$$u_2 = u_1 \sqrt{I_1/I_2}. \quad (5)$$

Далее распад разрыва на границе контакта с разгоняемой пластиной приведет к возникновению в последней ударной волны с параметрами на фронте, определяемыми точкой 3, которая является точкой пересечения прямой (2) при значении  $I = I_m$  с прямой  $p = I_2(2u_2 - u)$ , получаемой симметричным отображением линейной зависимости (2) со значением  $I = I_2$  относительно вертикали, проведенной через точку 2. Массовая скорость материала на фронте ударной волны, перешедшей в разгоняемую пластину, составит

$$u_3 = 2u_2 I_2 / (I_2 + I_m). \quad (6)$$

В отраженной от свободной поверхности разгоняемой пластины волне разгрузки она приобретет свою результирующую скорость  $v_m = 2u_3$ , которая после последовательной подстановки  $u_3$  согласно (6),  $u_2$  согласно (5) и  $u_1$  согласно (3) даст следующее значение коэффициента увеличения скорости:

$$\frac{v_m}{v_0} = \frac{4I_s \sqrt{I_1 I_2}}{(I_s + I_1)(I_2 + I_m)}. \quad (7)$$

Исследуя полученное выражение (7) на экстремум по значениям  $I_1$ ,  $I_2$ , нетрудно установить, что коэффициент увеличения скорости максимален при  $I_1 = I_s$  и  $I_2 = I_m$ , т. е. когда акустический импеданс разгонного слоя непрерывно уменьшается от импеданса ударного элемента до импеданса разгоняемой пластины. В этом случае соотношение (7) для коэффициента увеличения скорости упрощается:

$$\frac{v_m}{v_0} = \sqrt{\frac{I_s}{I_m}}. \quad (8)$$

В отсутствие разгонного слоя между ударным элементом и разгоняемой пластиной в последней при ударе будет сгенерирована ударная волна с массовой скоростью на ее фронте

$$u_0 = v_0 I_s / (I_s + I_m),$$

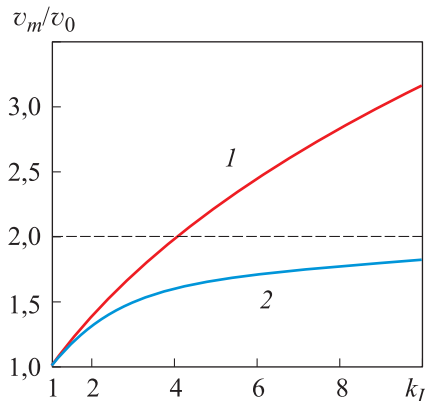
определяемой параметрами точки 4 (см. рис. 5), лежащей на пересечении прямой (2) при значении  $I = I_m$  с прямой  $p = I_s(v_0 - u)$ , соответствующей изменению параметров в ударном элементе. Соответственно, при данном значении  $u_0$  приобретенная пластиной результирующая скорость  $v_m = 2u_0$  даст коэффициент увеличения скорости

$$\frac{v_m}{v_0} = \frac{2I_s}{I_s + I_m}. \quad (9)$$

Вводя в рассмотрение коэффициент соотношения акустических импедансов ударного элемента и разгоняемой пластины  $k_I = I_s/I_m$ , зависимости (8), (9) для коэффициента увеличения скорости для схемы с наличием между ударным элементом и пластиной промежуточного разгонного слоя с непрерывным уменьшением импеданса от значения  $I_s$  до  $I_m$  и схемы с ударом элемента непосредственно по разгоняемой пластине можно переписать, соответственно, в виде

$$v_m/v_0 = \sqrt{k_I}; \quad v_m/v_0 = 2k_I/(k_I + 1).$$

Если во втором случае при неограниченном увеличении соотношения импедансов ( $k_I \rightarrow \infty$ ) предельный коэффициент увеличения скорости ограничивается значением 2, то в первом случае он возрастает неограниченно (рис. 6).



**Рис. 6.** Влияние соотношения акустических импедансов ударного элемента и разгоняемой пластины на коэффициент увеличения скорости:

1 — при наличии между ударным элементом и пластиной разгонного слоя с непрерывным уменьшением акустического импеданса от значения, соответствующего ударному элементу, до значения, соответствующего пластине; 2 — при соударении ударного элемента непосредственно с разгоняемой пластиной

**Закключение.** Проведенные исследования показали, что введение между ударным элементом и разгоняемой пластиной промежуточной системы пластин с монотонно уменьшающимся акустическим импедансом от значения, соответствующего материалу ударного элемента, до значения, соответствующего материалу разгоняемой пластины, позволяет существенно повысить эффективность преобразования ки-

нетической энергии ударного элемента в кинетическую энергию пластины. Наибольшая эффективность может быть достигнута при использовании промежуточного разгонного слоя с непрерывным по его толщине уменьшением акустического импеданса. Возможности практической реализации такого способа ударного разгона пластин найдутся в прямой зависимости от прогресса в области развития технологий получения так называемых градиентных материалов [30, 31], функциональные свойства которых изменяются по их объему заданным систематическим образом.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Christiansen E. Design and performances equations for advanced meteoroid and debris shield. *International Journal of Impact Engineering*, 1993, vol. 14, pp. 145–156.
- [2] Smirnov N.N., Kiselev A.B., Kondratyev K.A., Zolkin S.N. Impact of debris particles on space structures modeling. *Acta Astronautica*, 2010, vol. 67, pp. 333–343.
- [3] Fahrenthold E.P., Hernandez R.J. Simulation of orbital debris impact on the Space Shuttle wing leading edge. *International Journal of Impact Engineering*, 2006, vol. 33, pp. 231–243.
- [4] Герасимов А.В., Добрица Д.Б., Пашков С.В., Христенко Ю.Ф. Теоретико-экспериментальное исследование способа защиты космических аппаратов от высокоскоростных частиц. *Космические исследования*, 2016, т. 54, № 2, с. 126–134.
- [5] Новиков Л.С. *Воздействие твердых частиц естественного и искусственного происхождения на космические аппараты*. Москва, Университетская книга, 2009, 104 с.
- [6] Hyde J.L., Christiansen E.L., Kerr J.H. Meteoroid and orbital debris risk mitigation in a low Earth orbit satellite constellation. *International Journal of Impact Engineering*, 2001, vol. 26, pp. 345–356.
- [7] Зеленцов В.В. Проблемы мелкого космического мусора. *Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2015, № 4, с. 89–104.  
DOI: 10.7463/0415.0764904
- [8] Smirnov N.N., Nazarenko A.I., Kiselev A.B. Modelling of the space debris evolution based on continua mechanics. *European Space Agency (Special Publication) ESA SP*, 2001, vol. 1, no. 473, pp. 391–396.
- [9] Cable A.J. Hypervelocity accelerators. In: *High-velocity impact phenomena*. Kinslow R., ed. New York, London, Academic Press, 1970, 592 p.
- [10] Minin V.F., Minin I.V., Minin O.V. Hypervelocity fragment formation technology for ground-based laboratory tests. *Acta Astronautica*, 2014, vol. 104, pp. 77–83.
- [11] Златин Н.А., Красильщиков А.П., Мишин Г.И., Попов Н.Н. *Баллистические установки и их применение в экспериментальных исследованиях*. Москва, Наука, 1974, 344 с.
- [12] Piekutowski A.J., Poormon K.L. Development of a three-stage, light-gas gun at the University of Dayton Research Institute. *International Journal of Impact Engineering*, 2006, vol. 33, pp. 615–624.
- [13] Мартынов В.В., Шуневич Н.А. Направления улучшения характеристик легкогазовой установки. *Известия ТулГУ. Технические науки*, 2022, вып. 4, с. 497–501.

- [14] Khristenko Yu.F., Zelepugin S.A., Gerasimov A.V. New light-gas guns for the high-velocity throwing of mechanical particles. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2017, vol. 12, no. 22, pp. 6606–6610.
- [15] Rashleigh S.C., Marshall R.A. Electromagnetic acceleration of macroparticles to high velocities. *Journal of Applied Physics*, 1978, vol. 49, no. 4, pp. 2540–2542.
- [16] Станкевич С.В., Швецов Г.А. Предельные кинематические характеристики рельсовых электромагнитных ускорителей с металлическим якорем во внешнем магнитном поле. *Прикладная механика и техническая физика*, 2014, т. 55, № 5, с. 14–20.
- [17] Lemke R.W., Knudson M.D., Davis J.-P. Magnetically driven hyper-velocity launch capability at the Sandia Z accelerator. *International Journal of Impact Engineering*, 2011, vol. 38, pp. 480–485.
- [18] Орленко Л.П., ред. *Физика взрыва. В двух томах. Т. 2*. Москва, Физматлит, 2004, 656 с.
- [19] Андреев С.Г., Бойко М.М., Клименко В.Ю. Метательное действие зарядов взрывчатых веществ при распространении иницирующих и детонационных волн. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2016, вып. 4. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2016-04-1483>
- [20] Круглов П.В., Колпаков В.И. Анализ влияния разнотолщинности профиля металлических сегментных облицовок на форму высокоскоростных удлиненных элементов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2018, вып. 7. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2018-7-1782>
- [21] Федоров С.В. О возможности «отсечки» лидирующего высокоскоростного участка металлической струи при взрыве кумулятивного заряда в аксиальном магнитном поле. *Боеприпасы и высокоэнергетические конденсированные системы*, 2008, № S2, с. 73–80.
- [22] Федоров С.В. Усиление магнитного поля в металлических кумулятивных струях при их инерционном удлинении. *Физика горения и взрыва*, 2005, т. 41, № 1, с. 120–128.
- [23] Selivanov V.V., Ladov S.V., Nikolskaya Ya.M., Fedorov S.V. Research of the explosive formation of a compact element for meteoroids fragments and space debris modeling. *Acta Astronautica*, 2019, vol. 163, pp. 84–90.
- [24] Бабуринов М.А., Баскаков В.Д., Зарубина О.В., Ладов С.В., Никольская Я.М., Федоров С.В. Применение профилированных по толщине заготовок для управления толщиной стенки штампуемых свинцом оболочковых деталей. *Технология металлов*, 2016, № 11, с. 2–8.
- [25] Федоров С.В., Ладов С.В., Никольская Я.М., Баскаков В.Д., Бабуринов М.А., Курепин А.Е., Горбунков А.А., Пирозерский А.С. Формирование потока высокоскоростных частиц кумулятивными зарядами с облицовкой полу-сфера-цилиндр дегрессивной толщины. *Физика горения и взрыва*, 2017, т. 53, № 4, с. 122–125.
- [26] Greenaway M.W., Proud W.G., Field J.E., Goveas S.G. A laser-accelerated flyer plates. *International Journal of Impact Engineering*, 2003, vol. 29, pp. 317–321.
- [27] Chhabildas L.C., Kmetyk L.N., Reinhart W.D., Hall C.A. Enhanced hypervelocity launcher — capabilities to 16 km/s. *International Journal of Impact Engineering*, 1995, vol. 17, pp. 183–194.
- [28] Thornhill T.F., Chhabildas L.C., Reinhart W.D., Davidson D.L. Particle launch to 19 km/s for micro-meteoroid simulation using enhanced three-stage light gas gun hypervelocity launcher techniques. *International Journal of Impact Engineering*, 2006, vol. 33, pp. 799–811.



- [29] Бабкин А.В., Колпаков В.И., Охитин В.Н., Селиванов В.В. *Прикладная механика сплошных сред. В трех томах. Т. 3. Численные методы в задачах физики быстротекущих процессов*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006, 520 с.
- [30] Герасимов А.В., Кректулева Р.А. Модель деформирования и разрушения многокомпонентной пористой упругопластической среды с непрерывным изменением физико-механических характеристик. *Проблемы прочности*, 1999, № 2, с. 139–150.
- [31] Герасимов А.В., Шалковский Д.М. Ударно-волновое нагружение пластин, содержащих слои функционально градиентных материалов. *Механика композиционных материалов и конструкций*, 2002, т. 8, № 4, с. 533–542.

Статья поступила в редакцию 05.10.2022

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Фёдоров С.В., Старшикова А.С., Люшнин С.А. Об ударно-волновом разгоне материала в системе пластин с уменьшающейся акустической жесткостью. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2022, вып. 10.  
<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2022-10-2216>

**Фёдоров Сергей Владимирович** — старший преподаватель кафедры «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана; автор более 300 научных работ в области физики взрыва и высокоскоростного удара.  
e-mail: fedorovsv@bmstu.ru

**Старшикова Анна Станиславовна** — студентка 5-го курса кафедры «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана.  
e-mail: starshikovaas@student.bmstu.ru

**Люшнин Станислав Анатольевич** — канд. техн. наук, член-корр. РАЕН, доцент кафедры «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана; автор около 100 научных работ в области систем автоматизированного проектирования изделий машиностроения. e-mail: lushnin@bmstu.ru

## On the material shock-wave acceleration in a system of plates with the decreasing acoustic hardness

© S.V. Fedorov, A.S. Starshikova, S.A. Lyushnin

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

*To obtain the high-speed metal particles in simulating the impact of meteoroids and fragments of space debris on the spacecraft protective screens, shock-wave acceleration of thin metal plates is used at their collision with the impact element accelerated by a light-gas ballistic installation. Such an element is provided at the front end with an insert of layers with acoustic stiffness decreasing outwards. The effect of increasing speed of a plate accelerated by the plate impact is considered, when an intermediate system of plates with monotonically decreasing acoustic impedance is installed between it and the impact element, which values are between the impact element and the accelerated plate impedances. Based on numerical simulation in the framework of a plane one-dimensional problem of continuum mechanics, the shock-wave acceleration of an aluminum plate was studied in its direct collision with a tantalum impact element, as well as in the presence of one intermediate plate of copper or two intermediate plates of copper and titanium between them. An increase in the coefficient of accelerated plate raising speed relative to the impact element speed was registered with an increase in the number of intermediate plates. Using acoustic approximation, an analytical solution to the problem of plate acceleration in the presence of a system of the infinite number of infinitely thin plates with the continuously decreasing acoustic impedance between it and the impact element was obtained.*

**Keywords:** anti-meteorite protection, light-gas ballistic installation, impact element, system of plates, target plate, shock-wave acceleration, acoustic impedance

### REFERENCES

- [1] Christiansen E. Design and performances equations for advanced meteoroid and debris shield. *International Journal of Impact Engineering*, 1993, vol. 14, pp. 145–156.
- [2] Smirnov N.N., Kiselev A.B., Kondratyev K.A., Zolkin S.N. Impact of debris particles on space structures modeling. *Acta Astronautica*, 2010, vol. 67, pp. 333–343.
- [3] Fahrenthold E.P., Hernandez R.J. Simulation of orbital debris impact on the Space Shuttle wing leading edge. *International Journal of Impact Engineering*, 2006, vol. 33, pp. 231–243.
- [4] Gerasimov A.V., Dobritsa D.B., Pashkov S.V., Khristenko Yu.F. Teoretiko-eksperimentalnoe issledovanie sposoba zashchity kosmicheskikh apparatov ot vysokoskorostnykh chastits [Theoretical and experimental study of a method for a spacecraft protection from the high-speed particles]. *Kosmicheskie issledovaniya — Cosmic Research*, 2016, vol. 54, no. 2, pp. 118–126.
- [5] Novikov L.S. *Vozdeystvie tverdykh chastits estestvennogo i iskusstvennogo proiskhozhdeniya na kosmicheskie apparaty* [Impact of solid particles of natural and artificial origin on the spacecraft]. Moscow, Universitetskaya kniga Publ., 2009, 109 p.

- [6] Hyde J.L., Christiansen E.L., Kerr J.H. Meteoroid and orbital debris risk mitigation in a low Earth orbit satellite constellation. *International Journal of Impact Engineering*, 2001, vol. 26, pp. 345–356.
- [7] Zelentsov V.V. Problemy melkogo kosmicheskogo musora [Problems of small space debris]. *Nauka i obrazovanie. MGTU im. N.E. Baumana — Science and Education. Bauman Moscow State Technical University*, 2015, no. 4, pp. 89–104. <https://doi.org/10.7463/0415.0764904>
- [8] Smirnov N.N., Nazarenko A.I., Kiselev A.B. Modelling of the space debris evolution based on continua mechanics. *European Space Agency (Special Publication) ESA SP*, 2001, vol. 1, no. 473, pp. 391–396.
- [9] Cable A.J. Hypervelocity accelerators. In: *High-velocity impact phenomena*. Kinslow R., ed. New York, London, Academic Press, 1970, 592 p.
- [10] Minin V.F., Minin I.V., Minin O.V. Hypervelocity fragment formation technology for ground-based laboratory tests. *Acta Astronautica*, 2014, vol. 104, pp. 77–83.
- [11] Zlatin N.A., Krasilschikov A.P., Mishin G.I., Popov N.N. *Ballisticheskie ustanovki i ikh primeneniye v eksperimentalnykh issledovaniyakh* [Ballistic installations and their application in the experimental studies]. Moscow, Nauka Publ., 1974, 344 p.
- [12] Piekutowski A.J., Poormon K.L. Development of a three-stage, light-gas gun at the University of Dayton Research Institute. *International Journal of Impact Engineering*, 2006, vol. 33, pp. 615–624.
- [13] Martynov V.V., Shunevich N.A. Napravleniya uluchsheniya kharakteristik legkogazovoy ustanovki [Areas of improving the light-gas installation performance]. *Izvestiya TulGU, Tekhnicheskie nauki — Proceedings of the Tula State University, Technical Sciences*, 2022, vol. 4, pp. 497–501.
- [14] Khristenko Yu.F., Zelepugin S.A., Gerasimov A.V. New light-gas guns for the high-velocity throwing of mechanical particles. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2017, vol. 12, no. 22, pp. 6606–6610.
- [15] Rashleigh S.C., Marshall R.A. Electromagnetic acceleration of macroparticles to high velocities. *Journal of Applied Physics*, 1978, vol. 49, no. 4, pp. 2540–2542.
- [16] Stankevich S.V., Shvetsov G.A. Predelnye kinematicheskie kharakteristiki relsovykh elektromagnitnykh uskoriteley s metallicheskim yakorem vo vneshnem magnitnom pole [Ultimate kinematic characteristics of the rail electromagnetic launchers with metal armatures in the external magnetic field]. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika — Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2014, vol. 55, no. 5, pp. 14–20.
- [17] Lemke R.W., Knudson M.D., Davis J.-P. Magnetically driven hyper-velocity launch capability at the Sandia Z accelerator. *International Journal of Impact Engineering*, 2011, vol. 38, pp. 480–485.
- [18] Orlenko L.P., red. *Fizika vzryva* [Physics of explosion]. In two volumes. Moscow, Fizmatlit Publ., 2004, vol. 2, 656 p.
- [19] Andreev S.G., Boyko M.M., Klimenko V.Yu. Metatelnoe deystviye zaryadov vzryvchatykh veshchestv pri rasprostraneni i initsiiruyuschikh i detonatsionnykh voln [Explosive charge projectile action during initiating and detonating wave propagation]. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2016, iss. 4. <http://10.18698/2308-6033-2016-04-1483>
- [20] Kruglov P.V., Kolpakov V.I. Analiz vliyaniya raznotolschinnosti profilya metallicheskih segmentnykh oblitsovok na formu vysokoskorostnykh udlinennykh elementov [Analysis of influence of the metal linings profile heterogeneity on the high-speed elongated elements shape]. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2018, iss. 7. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2018-7-1782>

- [21] Fedorov S.V. O vozmozhnosti “otsechki” lideruyuschego vysokoskorostnogo uchastka metallicheskoj strui pri vzryve kumulyativnogo zaryada v aksialnom magnitnom pole [On the possibility of “cutting-off” the leading high-speed portion of the metal jet in explosion of a shaped charge in the axial magnetic field]. *Boeprirasy i vysokoenergeticheskie kondensirovannye sistemy — Ammunitions and high-energy condensed systems*, 2008, no. S2, pp. 73–80.
- [22] Fedorov S.V. Usilenie magnitnogo polya v metallicheskih kumulyativnykh struyakh pri ikh inertsiennom udlinenii [Magnetic field amplification in metal shaped-charge jets during their inertial elongation]. *Fizika goreniya i vzryva — Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2005, vol. 41, no. 1, pp. 120–128.
- [23] Selivanov V.V., Ladov S.V., Nikolskaya Ya.M., Fedorov S.V. Research of the explosive formation of a compact element for meteoroids fragments and space debris modeling. *Acta Astronautica*, 2019, vol. 163, pp. 84–90.
- [24] Baburin M.A., Baskakov V.D., Zarubina O.V., Ladov S.V., Nikolskaya Ya.M., Fedorov S.V. Primenenie profilirovannykh po tolschine zagotovok dlya upravleniya tolschinoy stenki shtampuemykh svintsom obolochnykh detaley [Application of thickness-shaped workpieces to control wall thickness of the lead-formed shell parts]. *Tekhnologiya metallov — Russian Metallurgy (Metally)*, 2016, no. 11, pp. 2–8.
- [25] Fedorov S.V., Ladov S.V., Nikolskaya Ya.M., Baskakov V.D., Baburin M.A., Kurepin A.E., Gorbunkov A.A., Pirozerskiy A.S. Formirovanie potoka vysokoskorostnykh chastits kumulyativnymi zaryadami s oblitovkoy polusferatsilindr degressivnoy tolschiny [Formation of the high-velocity particle flow by shaped charges with the hemisphere-cylinder linear of the digressive thickness]. *Fizika goreniya i vzryva — Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2017, vol. 53, no. 4, pp. 122–125.
- [26] Greenaway M.W., Proud W.G., Field J.E., Goveas S.G. A laser-accelerated flyer plates. *International Journal of Impact Engineering*, 2003, vol. 29, pp. 317–321.
- [27] Chhabildas L.C., Kmetyk L.N., Reinhart W.D., Hall C.A. Enhanced hypervelocity launcher — capabilities to 16 km/s. *International Journal of Impact Engineering*, 1995, vol. 17, pp. 183–194.
- [28] Thornhill T.F., Chhabildas L.C., Reinhart W.D., Davidson D.L. Particle launch to 19 km/s for micro-meteoroid simulation using enhanced three-stage light gas gun hypervelocity launcher techniques. *International Journal of Impact Engineering*, 2006, vol. 33, pp. 799–811.
- [29] Babkin A.V., Kolpakov V.I., Okhitin V.N., Selivanov V.V. *Prikladnaya mekhanika sploshnykh sred. V trekh tomakh. T. 3. Chislennye metody v zadachyakh fiziki bystroprotekayuschikh protsessov* [Applied Continuum Mechanics. In 3 volumes. Vol. 3. Numerical methods in problems of physics of the fast-flowing processes]. Moscow, BMSTU Publ., 2006, 520 p.
- [30] Gerasimov A.V., Krektuleva R.A. Model deformirovaniya i razrusheniya mnogokomponentnoy poristoy uprugoplasticheskoj sredy s nepreryvnym izmeneniem fiziko-mekhanicheskikh kharakteristik [Deformation and fracture model for a multicomponent elastoplastic porous medium with continuous variation of the physico-mechanical characteristics]. *Problemy prochnosti — Strength of Materials*, 1999, no. 2, pp. 139–150.
- [31] Gerasimov A.V., Shalkovsky D.M. Udarno-volnovoe nagruzhenie plastin, soderzhaschikh sloi funktsionalno gradientnykh materialov [Shock-wave loading of plates containing layers of functionally gradient materials]. *Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruksiy — Journal of Composite Mechanics and Design*, 2002, vol. 8, no. 4, pp. 533–542.

**Fedorov S.V.**, Senior Lecturer, Department of High-Precision Aircraft, Bauman Moscow State Technical University; author of more than 300 scientific papers in the field of explosion physics and high-speed impact. e-mail: fedorovsv@bmstu.ru

**Starshikova A.S.**, 5th year Student, Department of High-Precision Aircraft, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: starshikovaas@student.bmstu.ru

**Lyushnin S.A.**, Cand. Sc. (Engineering), Associate Member of RANS, associate professor, Department of High-Precision Aircraft, Bauman Moscow State Technical University; author of about 100 publications in the field of mechanical engineering CAD systems. e-mail: lushnin@bmstu.ru