05

Пористые металлические экраны против техногенного космического мусора

© Б.В. Румянцев, А.И. Козачук

ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: brum@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 25 апреля 2025 г.
В окончательной редакции 11 июля 2025 г.
Принято к публикации 12 июля 2025 г.

Исследовано действие удлиненного ударника со скоростью более 8 km/s по преграде после прохождения пористого экрана. Установлена область эффективного взаимодействия ударника с экраном, совпадающая с аномальным поведением ударной адиабаты сжатия пористого металла экрана. Обсуждаются тепловое возмущение ударника от высокой температуры ударно-сжатого пористого материала экрана и особенности последующего внедрения в преграду.

Ключевые слова: удар, пористый экран, компактирование, плазма, температура.

DOI: 10.61011/PJTF.2025.20.61395.20360

В работе исследуются последствия возмущения удлиненного металлического ударника после прохождения пористых металлических экранов при скоростях и форме, характерных для фрагментов техногенного мусора в околоземном космическом пространстве. В обзоре [1] проведен анализ многочисленных вариантов исполнения экранов. Отмечены особенности применения пористой меди в составе экрана по действию на преграду остатков разрушенного компактного ударника. В работах [2,3] было показано влияние на параметры действия по преграде фазовых превращений (плавление, испарение) во взаимодействующих материалах ударника и экрана при скоростях более 8 km/s. Быстрые фазовые превращения, идущие с увеличением удельного объема, обеспечивали возмущение ударника при прохождении экранов и уменьшение его действия по преграде.

Известно, что пористые металлы при ударном сжатии выше давлений, обеспечивающих плавление и частичное испарение матричной среды, позволяют достичь более высоких температур, чем в случае ударного сжатия сплошных материалов [4,5]. При изоэнтропической разгрузке ударно-сжатого пористого металла до давлений ниже критической точки матричной среды конечное состояние существует в виде смеси двух фаз (жидкость–газ) или в виде плазмы [6,7].

Цель настоящей работы — определить, может ли пористость улучшить эффективность экранов [8,9], по уменьшению действия по преграде удлиненного высокоскоростного ударника (ВСКУ) со скоростью более 8 km/s в условиях конического расходящегося ударного сжатия малопрочного конденсированного материала экрана.

Исследования проводились в вакуумной камере при давлении менее 1 kPa. Схема эксперимента приведена на рис. 1, *a*. ВСКУ в виде медной струи формировался при взрыве устройства *1*, содержащего высокоэнергетическое вещество (5 kJ/g) массой 40 g с медной воронкой *2*. Сформированный ВСКУ с начальной скоростью $V_{j0} = 8.26$ km/s проходил пористые экраны *3* и после растяжения на расстоянии 6 cm внедрялся в преграду *4*. Средний диаметр ударника составлял 0.08 cm при длине 9.8 cm. Экраны с малой пористостью изготавливались прессованием медного порошка ПМС-1 (ГОСТ 4960–75) дисперсностью $10-100\,\mu$m на латунную сетку. В насыпном виде применялся медный порошок в виде сферических частиц размером $40-70\,\mu$m марки ПМФ-40 из герметичных стеклянных ампул. Пакет из латунных сеток (ГОСТ 6613–86) № 16 и 18 позволял получать экраны с повышенной пористостью. Пластины экранов размером 4×4 cm имели толщину, соответствующую постоянству массы единичной площади 0.89 g/cm^2, что эквивалентно сплошному медному экрану толщиной 0.1 cm. Для преграды *4* применялись листы сплава АМг6 толщиной 1 cm, между которыми размещались контактные датчики *5*.

Результаты экспериментов приведены в таблице и на рис. 1, *b*. Видно, что значения глубины каверны в преграде от действия медного ВСКУ после прохождения двух медных пористых экранов распадаются на два диапазона: строки 1–4 и 5–8 таблицы. Снижение пробития преграды достигается при плотности экранов R_s менее 5 g/cm^3. Объем каверны в преграде меняется незначительно для основного диапазона изменения плотности (за исключением сплошных экранов).

В работе [11] экспериментально было показано преимущество применения медных экранов, вызывающих повышенное возмущение ВСКУ при $V_{j0} > 8$ km/s за счет частичного испарения меди. При этом отмечалась дестабилизация ВСКУ, проявляющаяся в замедлении траектории внедрения и уменьшении глубины пробития преграды. Измеренные траектории внедрения ВСКУ в преграду после пористых экранов показывают увеличе-

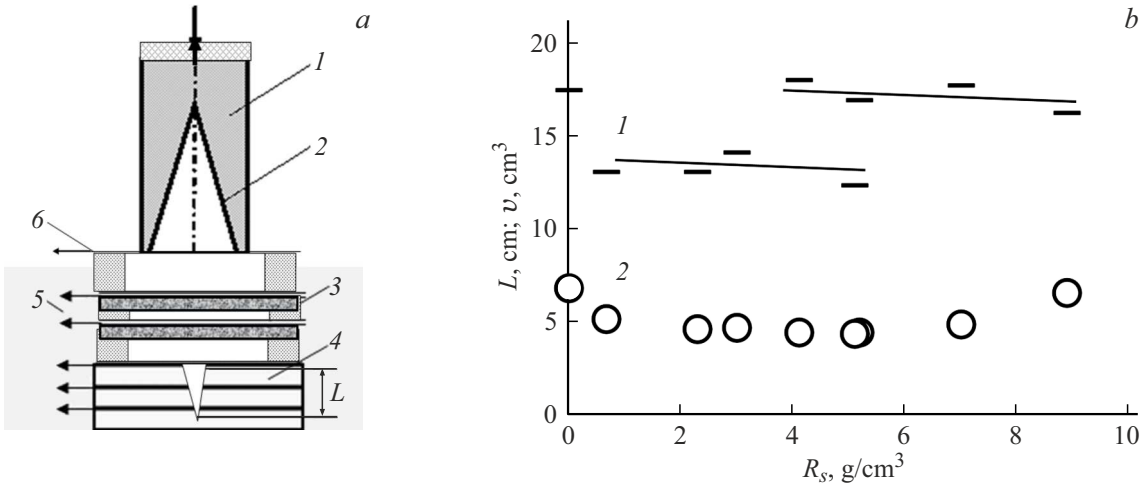


Рис. 1. *a* — схема эксперимента. *1* — цилиндр диаметром 2.5 cm из высокоэнергетического органического вещества массой 40 g; *2* — медная воронка диаметром 2 cm в основании, толщиной 0.08 cm, угол при вершине 30°; *3* — экраны из пористой меди; *4* — преграда из листов сплава АМг6 с каверной после действия ВСКУ; *5* — контактные датчики для измерения времени внедрения; *6* — фольга толщиной 40 μm из алюминия. *b* — параметры каверны в преграде из АМг6 от действия ВСКУ после прохождения экранов из пористой меди плотностью R_s: *1* — глубина L, *2* — объем v.

Экспериментальные результаты изучения поглощения ВСКУ ($R_j = 8.9\,\mathrm{g/cm^3}$, $V_{j0} = 8.26\,\mathrm{km/s}$ — плотность и начальная скорость медного ударника) преградой из сплава АМг6 после прохождения экранов из пористой меди с плотностью R_s

Номер п/п	Экраны					Преграда	
	Плотность R_s, g/cm^3	Толщина экрана t_s, cm	Параметры пробития			Параметры каверны	
			Скорость U^*, km/s	Время $2t_s/U$, μs	Давление P^*, GPa	Глубина L, cm	Объем v, cm^3
1	8.9	0.1	4.1	0.48	76	16.1	6.5
2	7.0	0.12	4.4	0.51	67	17.6	4.8
3	5.2	0.2	4.7	0.79	57	16.8	4.4
4	4.1	0.2	4.9	0.74	50	17.8	4.4
5	3.0	0.3	5.2	1.03	41	14.0	4.7
6	2.3	0.4	5.5	1.24	34	12.9	4.6
7	5.1	0.2	4.7	0.78	56	12.2	4.4
8	0.66	0.9	6.5	1.4**	14	12.9	4.9
9	Без экранов					17.8	6.9

* Скорости пробития экранов U и начальное давление P в области взаимодействия ударник–экран определены исходя из одномерного приближения описания струйных течений по уравнению Бернулли без учета сжимаемости [10] для начальной скорости ударника.
** Один экран.

ние замедления внедрения по мере снижения плотности до 4.1 g/cm^3, но экспериментальные результаты по глубине пробития преграды не меняются.

При рассмотрении примера действия ударника (рис. 2, *a*, *b* из работы [12]) видно, что пористая среда после внедрения не схлопывается в отличие от внедрения в прочные сплошные среды [13]. Внедрение ударника идет в ударно-сжатую компактированную часть пористой среды с плотностью меньше сплошной среды, но с большей температурой и удельной энергией [4,5], причем давление компактирования увеличивается при снижении плотности исходной пористой среды [14]. В условиях внедрения ВСКУ компактированная часть пористой среды покрывает поверхность каверны (рис. 2, *a*, *b*).

Применение пористых экранов сопровождается увеличением температуры и доли тепловой энергии испаренной меди в продуктах локального взаимодействия экрана с ВСКУ. Изменение влияния плотности экранов менее 5 g/cm^3 показывает, что появляется новый механизм, определяющий внедрение ВСКУ в пористые среды, в отличие от исследованных ранее материалов [3,11–13].

Данные работы [15] по определению адиабат и изотерм меди с различной пористостью при плоском ударно-волновом сжатии демонстрируют при плотности менее 4 g/cm^3 и давлении до 200 GPa аномальное поведение ударной адиабаты, когда увеличение давления ударного сжатия приводит к увеличению удельного объема и повышению температуры пористой среды.

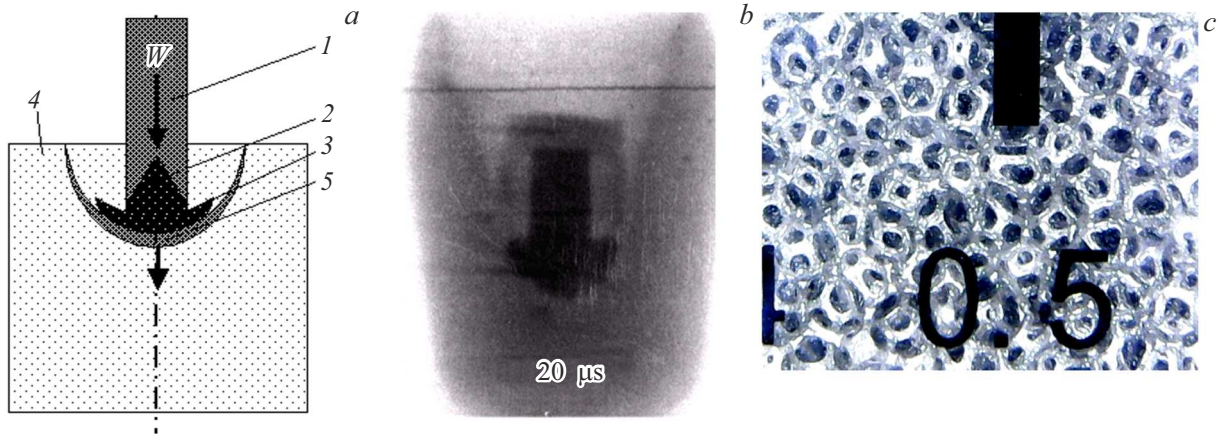


Рис. 2. *a* — схема внедрения. *1* — стальной ударник; *2*, *3* — зоны сжатого и пластически деформированного ударника; *4* — порошок корунда; *5* — зона ударно-сжатого порошка. *b* — импульсная рентгенограмма процесса внедрения стального ударника диаметром 0.6 cm со скоростью $W = 1006$ m/s в корунд плотностью 2.0 g/cm^3. *c* — структура пористого композита на основе никеля (толщина линии репера 0.5 mm).

При внедрении ВСКУ в экран идет мгновенный прогрев вновь поступающего материала ударника от теплового излучения стенки каверны (рис. 2, *a*, *b*). Таким образом, возмущение ВСКУ после прохождения экранов с плотностью менее 4.5 g/cm^3 происходит без задержки, характерной для радиального кинетического (механического) действия стенок каверны [13], и определяется нагревом от излучения ударно-сжатого пористого материала экрана. Последствия теплового возмущения в виде предполагаемой абляции части ВСКУ проявляются в уменьшении глубины каверны в преграде.

По графическому отображению данных [15] была проведена оценка температуры в области взаимодействия ударник–пористый экран для давлений по таблице. Она составляет $(9-10) \cdot 10^3$ K, что на порядок превышает начальную температуру ВСКУ при формировании из кумулятивной воронки *2* (рис. 1).

Вопрос о характере возмущения пролетающих последующих элементов ВСКУ (нагрев, абляция, испарение, превращение в плазму, разрушение, диспергирование) остается открытым.

Перспективы экранов из пористых металлов видны из результатов, приведенных в строках 5–8 таблицы. В частности, для пакетов из сеток и пористого никеля [16] проявляется влияние характера пористости (закрытая или открытая). Применение порошка меди из сферических частиц размером $50-100\,\mu$m из герметичной ампулы и пористого композита никеля (рис. 2, *c*) показывает влияние состояния поверхности частиц металла (отсутствие оксидной пленки). Уточнение влияния структуры металлических пористых экранов нуждается в дальнейших исследованиях.

Сопоставление экспериментальных результатов с данными работы [15] доказывает, что область эффективного возмущения ВСКУ при взаимодействии с металлическим экраном совпадает с аномальным поведением ударной адиабаты сжатия пористого металла.

Кинетика внедрения головных частей ВСКУ в преграду отражает замедление траектории по мере увеличения пористости металлического экрана.

Температура взаимодействия медного ударника со скоростью головной части более 8 km/s с пористым (более 50 %) медным экраном составляет $(9-10) \cdot 10^3$ K и определяет тепловое возмущение части ударника.

Несмотря на коническое расходящееся ударно-волновое сжатие от удлиненного ударника со скоростью более 8 km/s с пористым (более 50 %) медным экраном, показано уменьшение глубины внедрения в преграду из АМг6.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] П.В. Лаврухов, А.В. Пластинин, В.В. Сильвестров, Физика горения и взрыва, **40** (3), 87 (2004). [P.V. Lavrukhov, A.V. Plastinin, V.V. Sil'vestrov, Combust. Explos. Shock Waves, **40** (3), 328 (2004). DOI: 10.1023/B:CESW.0000028946.49070.de].

[2] B.V. Rumyantsev, I.V. Guk, A.I. Kozachuk, A.I. Mikhaylin, S.I. Pavlov, M.V. Silnikov, Acta Astronaut., **163 A**, 73 (2019). DOI: 10.1016/j.actaastro.2019.03.065

[3] Б.В. Румянцев, И.В. Гук, А.И. Козачук, А.И. Михайлин, С.И. Павлов, М.В. Сильников, Письма в ЖТФ, **47** (8), 15 (2021). DOI: 10.21883/PJTF.2021.08.50846.18672 [B.V. Rumyantsev, I.V. Guk, A.I. Kozachuk, A.I. Mikhailin, S.I. Pavlov, M.V. Sil'nikov, Tech. Phys. Lett., **47**, 409 (2021). DOI: 10.1134/S1063785021040271].

[4] Я.Б. Зельдович, Ю.П. Райзер, *Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений* (Наука, М., 1966).

[5] В.Е. Фортов, И.В. Ломоносов, УФН, **184** (3), 231 (2014). DOI: 10.3367/UFNr.0184.201403b.0231 [V.E. Fortov, I.V. Lomonosov, Phys. Usp., **57** (3), 219 (2014). DOI: 10.3367/UFNe.0184.201403b.0231].
[6] Г.И. Канель, С.В. Разоренов, А.В. Уткин, В.Е. Фортов, *Ударно-волновые явления в конденсированных средах* (Янус, М., 1996).
[7] Л.В. Альтшулер, А.В. Бушман, М.В. Жерноклетов, В.Н. Зубарев, А.А. Леонтьев, В.Е. Фортов, ЖЭТФ, **78** (2), 741 (1980). [L.V. Al'tshuler, A.V. Bushman, M.V. Zhernokletov, V.N. Zubarev. A.A. Leont'ev, V.E. Fortov, JETP, **51** (2), 373 (1980).].
[8] F. Whipple, Astron. J., **52**, 131 (1947). DOI: 10.1086/106009
[9] E.L. Christiansen, J. Arnold, A. David, J. Hyde, D. Lear, J.-C. Liou, F. Lyons, T. Prior, M. Ratliff, S. Ryan, F. Giovane, B. Corsaro, G. Studar, *Handbook for designing MMOD protection* (NASA, 2009).
[10] *Физика взрыва*, под ред. Л.П. Орленко (Физматлит, М., 2002), т. 2.
[11] Б.В. Румянцев, А.И. Михайлин, Письма в ЖТФ, **44** (3), 62 (2018). DOI: 10.21883/PJTF.2018.03.45580.16970 [B.V. Rumyantsev, A.I. Mikhailin, Tech. Phys. Lett., **44** (2), 115 (2018). DOI: 10.1134/S1063785018020128].
[12] Е.Л. Зильбербранд, Б.В. Румянцев, М.Д. Толкачев, С.М. Ушеренко, ЖТФ, **76** (10), 81 (2006). [E.L. Zil'berbrand, B.V. Rumyantsev, M.D. Tolkachev, S.M. Usherenko, Tech. Phys., **51** (10), 1334 (2006). DOI: 10.1134/S1063784206100124].
[13] B.V. Rumyantsev, V.Yu. Klimenko, AIP Conf. Proc., **1426**, 56 (2012). DOI: 10.1063/1.3686220.
[14] И.Р. Трунин, И.А. Терешкина, А.М. Подурец, В.Г. Симаков, В.А. Брагунец, И.Н. Кондрохина, А.В. Воронин, А.Н. Баландин, Вопросы атомной науки и техники. Сер. Теоретическая и прикладная физика, № 2, 22 (2014). https://rucont.ru/efd/559596
[15] Р.Ф. Трунин, Н.В. Попов, ТВТ, **38** (5), 754 (2000). [R.F. Trunin, N.V. Panov, High. Temp., **38** (5), 728 (2000). DOI: 10.1007/BF02755925].
[16] https://www.stal-splav.ru/catalog/izgotovlenie-poristykh-zagotovok/