

05

Анализ проникающей способности стержневых ударников из пористых материалов

© В.Ф. Толкачев¹, С.А. Зелепугин^{1,2}

¹ Национальный исследовательский Томский государственный университет, 634050 Томск, Россия

² Томский научный центр СО РАН, 634055 Томск, Россия
e-mail: szel@yandex.ru

Поступило в Редакцию 25 декабря 2018 г.

В окончательной редакции 19 апреля 2019 г.

Принято к публикации 13 мая 2019 г.

Представлены результаты экспериментального исследования и математического моделирования проникания стержневых ударников из пористых материалов в металлические преграды при осесимметричном высокоскоростном ударе. Результаты исследования свидетельствуют о существенном влиянии пористости материала ударника на процесс проникания, которая при сверхвысоких скоростях соударения приводит к увеличению глубины проникания в сравнении с ударниками монолитной плотности при равенстве их массы и диаметра. Данный эффект связывается с ускоренным образованием локализованных полос сдвига и последующей фрагментацией материала. Одним из возможных подходов для оценки глубины проникания может служить предлагаемая приближенная (инженерная) методика, в которой учитываются динамические прочностные характеристики материалов взаимодействующих тел. Проведено сравнение результатов расчетов по предложенной методике с экспериментальными данными, показавшее хорошее качественное и количественное их соответствие.

Ключевые слова: высокоскоростное проникание, пористый стержневой ударник, пробивное действие.

DOI: 10.21883/JTF.2019.12.48485.442-18

Возможности модернизации образцов высокоэффективных ударников из традиционных высокопрочных сталей и высокоплотных сплавов при функционировании их в условиях высокоскоростного удара к настоящему времени исчерпаны. Перспективным направлением усиления проникающей способности ударников кинетического действия является применение композиционных материалов комбинированного строения на основе тугоплавких соединений [1–3], либо неклассических материалов, например, сильнопористого материала с низкой и средней удельной плотностью [4–8].

Природа пористых материалов многообразна, они могут иметь самую различную структуру — порошки, тела с внутренними пустотами, керамика, ячеистые и др. Пористость вещества определяется как $\alpha = \rho_{00}/\rho_0$, где ρ_{00} — плотность пористого вещества, ρ_0 — плотность вещества в монолитном, беспористом состоянии. Процесс ударного сжатия пористых тел обладает определенными особенностями. Важность таких исследований впервые отмечена в [9]. Необходимо отметить, что цикл дальнейших исследований связан с интенсивным развитием авиационной, ракетной и космической техники. Исследования ударно-волновых свойств пористых материалов подтвердили их необходимость для решения ряда научно-технических задач, включающих высокоскоростные соударения и др. [10,11]. В частности, ведутся широкомасштабные поисковые исследования эффективных способов защиты Земли от опасных космических объектов (астероидов, метеороидов) различной массы,

летящих со сверхвысокими скоростями. В этом направлении можно на околоземной орбите строить космические модули из сыпучих (порошкообразных) материалов в качестве ударников различной массы и удлинения, которые будут способны при высокоскоростном взаимодействии либо разрушать космические тела, либо отклонять их траекторию движения.

Процессы высокоскоростного соударения твердых тел активно исследуются экспериментально, численно и с применением приближенных математических подходов [12–15]. Экспериментально и с помощью численного моделирования было показано [4], что пористый ударник, изготовленный из металлических опилок, проникает в гидродинамическом режиме в стальную мишень глубже, чем монолитный ударник, при условии равенства масс и диаметров, причем с увеличением пористости его преимущество в проникающей способности над монолитным возрастает. Очевидно, что увеличение глубины проникания пористых ударников при идентичных условиях связано со значительным увеличением их длины по мере разуплотнения материала. Однако представленные в [4] результаты носят ограниченный характер, при этом не рассматриваются физические аспекты выявленного эффекта, что не позволяет построить обобщающую модель процесса, применимую в иных условиях взаимодействия.

Целью настоящей работы является расширение знаний о механизме проникания стержневых ударников из материалов заданной пористости и возможности про-

гнозирования последствий процесса высокоскоростного взаимодействия на характер и параметры проникания и разрушения. Для достижения поставленной цели предложена приближенная (инженерная) методика прогнозирования глубины проникания пористых ударников в металлическую преграду. Методика базируется на гидродинамических представлениях с учетом прочностных характеристик взаимодействующих материалов [16–18] и степени сжимаемости материала ударника в контактной области с преградой.

При ударно-волновом взаимодействии поведение ударников из пористых материалов характеризуется рядом особенностей. На начальной стадии высокоскоростного взаимодействия работа сил внешнего давления затрачивается на закрытие пустот, на уплотнение вещества и приведение его к нормальному объему. Эта работа связана с преодолением сил трения между частицами, с раздроблением частиц, со смятием волокон и т.д. в зависимости от типа структуры. Для совершения этой работы требуются сравнительно небольшие давления, масштабом которых служат пределы прочности материалов. Для учета давлений сжатия в математическую модель вводится параметр P_f , полуэмпирическое соотношение для определения которого получено из анализа экспериментальных данных, результатов теоретических и численных исследований [3,9–11].

Алгоритм расчета глубины проникания стержневых ударников в преграду развит на основе имитационной модели высокоскоростного проникания стержневых ударников с учетом ударно-волновых и прочностных свойств материалов взаимодействующих тел. Процесс проникания ударника в преграду описывается системой кинематических уравнений [16–18], в которой дополнительно учитывается давление сжатия пористого вещества P_f при переходе к сплошному состоянию:

$$P_f = \frac{c_0^2(\rho_0 - \rho_{00})^2}{\rho_{00}[s/(s-1) + \rho_0/\rho_{00}]^2},$$

$$\frac{dV}{dt} = -\frac{\sigma^d}{\rho_{00}l(t)},$$

$$\frac{dl}{dt} = -(V - U),$$

$$dL = U dt,$$

$$0.5A\rho_{00}(V - U)^2 + \sigma^d + P_f = 0.5\rho_t U^2 + H_D,$$

$$A = (c_{00} + sU)/(c_{00} + (s-1)U), \quad (1)$$

где ρ_{00} — плотность пористого материала ударника; ρ_0 и ρ_t — плотности материала ударника и преграды соответственно; V, l — текущая скорость ударника и его длина; U — скорость контактной поверхности (массовая скорость); L — глубина проникания; σ^d — динамический предел текучести ударника; H_D — динамический предел прочности материала преграды; A — степень динамического сжатия, определяемая из ударной адиабаты материала ударника $D = c_{00} + sU$. Константам c_{00} и s

Параметры пористых и монолитных материалов

№	Материал	$\alpha = \rho_{00}/\rho_0$	$\rho_{00}, \text{g/cm}^3$	$c_{00}, \text{km/s}$	s
1	W	1.00	19.17	4.02	1.235
2	W (пористый)	0.70	13.36	3.75	2.07
3	W (пористый)	0.46	8.87	0.25	1.72
4	W (пористый)	0.29	5.5	0.025	1.50
5	W (пористый)	0.24	4.6	0.025	1.50
6	Cu	1.00	8.93	4.506	1.418
7	Сплав (Ni–Cu)	1.00	8.89	4.08	1.547

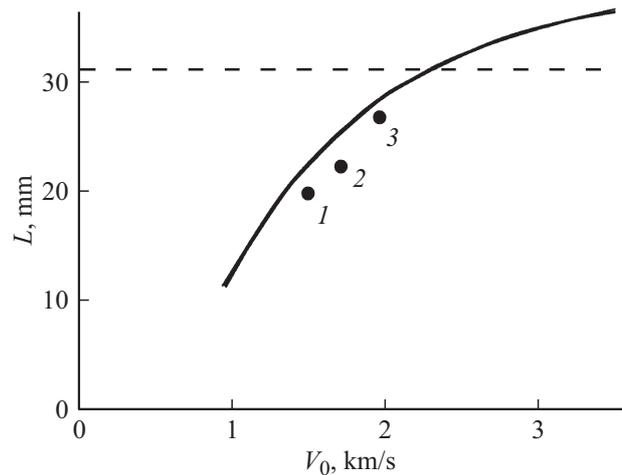


Рис. 1. Сравнение расчетных и экспериментальных данных по глубине проникания стержней из пористого вольфрама в стальную преграду: линия — расчет: $\rho_{00} = 13.36 \text{ g/cm}^3$, $l_0 = 24 \text{ mm}$; точки — эксперимент: 1 — $V_0 = 1470 \text{ m/s}$, $\rho_{00} = 13.0 \text{ g/cm}^3$, $l_0 = 24 \text{ mm}$; 2 — $V_0 = 1750 \text{ m/s}$, $\rho_{00} = 12.5 \text{ g/cm}^3$, $l_0 = 24.3 \text{ mm}$; 3 — $V_0 = 2100 \text{ m/s}$, $\rho_{00} = 13.2 \text{ g/cm}^3$, $l_0 = 24.1 \text{ mm}$.

соответствуют значения, приведенные в [19]. $\sigma^d = \alpha\sigma_0$, σ_0 — динамический предел текучести сплошного материала ударника.

По данной методике выполнены расчеты глубины проникания в стальные преграды ударников из пористого вольфрама, физико-механические характеристики и ударные адиабаты которого представлены в таблице, аппроксимированные в соответствии с данными [19].

Корректирующие константы модели подбирались при сравнении результатов расчетов с данными специально выполненных экспериментов. На рис. 1 представлено сравнение расчетной зависимости проникания ударника из пористого вольфрама ($\rho_{00} = 13.36$) с экспериментальными данными. Наблюдается хорошее качественное и количественное согласование результатов расчета с данными экспериментов.

На рис. 2 представлены расчетные зависимости глубины проникания L равных по массе и диаметру ударников из материалов различной пористости с матрицей из вольфрама. В качестве базового ударника выступал вольфрамовый ударник с параметрами: длина $l_0 = 60 \text{ mm}$, диаметр $d_0 = 6 \text{ mm}$, динамический предел текучести $\sigma_0 = 1.2 \text{ GPa}$. Преграда — высокопрочная сталь с преде-

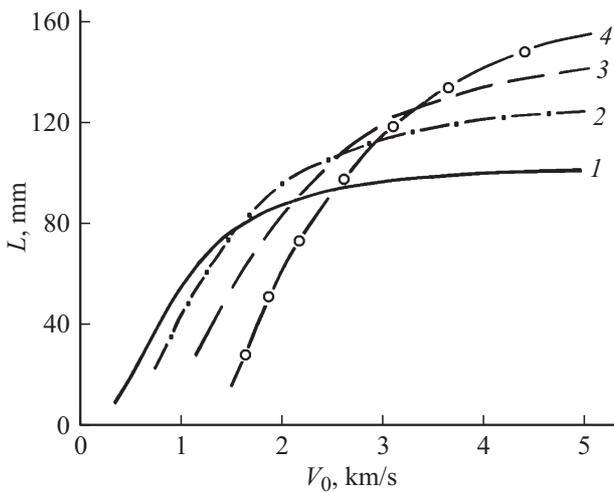


Рис. 2. Зависимости глубины проникания ударников от скорости удара при различной пористости материала: $m_0 = \text{constant}$; $d_0 = \text{constant}$; 1 — $\rho_0 = 19.17 \text{ g/cm}^3$, 2 — $\rho_0 = 13.36 \text{ g/cm}^3$, 3 — $\rho_0 = 8.87 \text{ g/cm}^3$, 4 — $\rho_0 = 5.55 \text{ g/cm}^3$.

лом текучести 400 ГПа и динамическим пределом прочности $H_D = 3.5 \text{ ГПа}$. График иллюстрирует смещение предельных скоростей начала проникания ударников в сторону увеличения скорости удара, а также свидетельствует о том, что с увеличением скорости соударения ударники из материалов с большей пористостью проникают в преграду глубже. Так, при скорости соударения 4 км/с пористый ударник с плотностью материала $\rho_0 = 8.87 \text{ g/cm}^3$ (кривая 3, рис. 2) проникает в стальную мишень глубже на 30% в сравнении с вольфрамовым ударником с плотностью $\rho_0 = 19.17 \text{ g/cm}^3$ (кривая 1). Наблюдаемое увеличение проникающей способности ударников из пористых материалов в сравнении с монолитными ударниками, очевидно, при данной постановке задачи является результатом их значительной длины.

Также результаты свидетельствуют о том, что увеличение проникающей способности ударников из пористых материалов в сравнении с монолитными ударниками проявляется только при высоких скоростях удара. Так, пористый вольфрамовый ударник с плотностью материала $\rho_0 = 8.87 \text{ g/cm}^3$ начинает демонстрировать более глубокое проникание по сравнению с монолитным только для скоростей удара выше 2500 м/с. Более того, увеличение начальной длины монолитного стержня, очевидно, отодвигает точку данного перехода в область еще более высоких скоростей удара.

Для выявления влияния пористости материала ударника на глубину проникания были проведены оценки внедрения монолитных и пористых ударников из разных материалов с одинаковым значением плотности и геометрических размеров. На рис. 3 представлены графические зависимости относительной глубины проникания ударников из сплава Ni–Cu (кривая 1 — $\rho_0 = 8.89 \text{ g/cm}^3$), меди (кривая 2 — $\rho_0 = 8.93 \text{ g/cm}^3$) и пористого вольфрама (кривая 3 — $\rho_0 = 8.87 \text{ g/cm}^3$,

$\alpha = 0.47$). Данные зависимости свидетельствуют о том, что ударники из пористого вольфрама при скоростях взаимодействия свыше 2000 м/с проникают в стальную преграду глубже и эффект усиливается с увеличением скорости соударения.

Анализ приведенных результатов исследования и литературных данных позволяет предположить, что увеличение проникающей способности пористых ударников свидетельствует об изменении механизма проникания. Многочисленными баллистическими испытаниями с последующими металлографическими исследованиями было показано, что эффективность проникания длинных стержней при высоких скоростях взаимодействия зависит не только от прочности и пластичности материала, но и от того, как он пластически деформируется и разрушается (растекается) под действием сдвиговых деформаций, от того, как ударник в контактной области приобретает „грибовидную“ форму. Так, в традиционных вольфрамовых сплавах наблюдается позднее образование полос локализации сдвига с последующим отделением фрагментов материала ударника, что и определяет величину диаметра кратера [2,20].

В пористом ударнике в процессе проникания вблизи поверхности контакта с преградой формируется присоединенная ударная волна [10,11,17,18]. Ее формирование обусловлено низкой скоростью звука в пористом материале. В этом случае можно предположить, что плотность материала скачкообразно возрастает на фронте ударной волны и при дальнейшем внедрении ударника на границе контакта она слабо меняется за счет постоянного втекания материала ударника с начальной скоростью взаимодействия. Можно также предположить, что в случае проникания пористых ударников наблюдается раннее образование полос локализации сдвига и отделение фрагментов. Такой механизм проникания позволяет ударнику быстро „сбрасывать“ деформированный материал, уменьшать площадь контакта и в результате

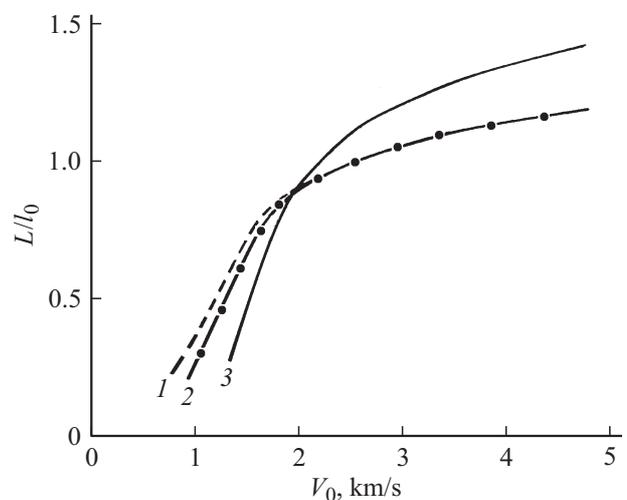


Рис. 3. Изменение относительной глубины проникания монолитных и пористых ударников с одинаковой плотностью материала.

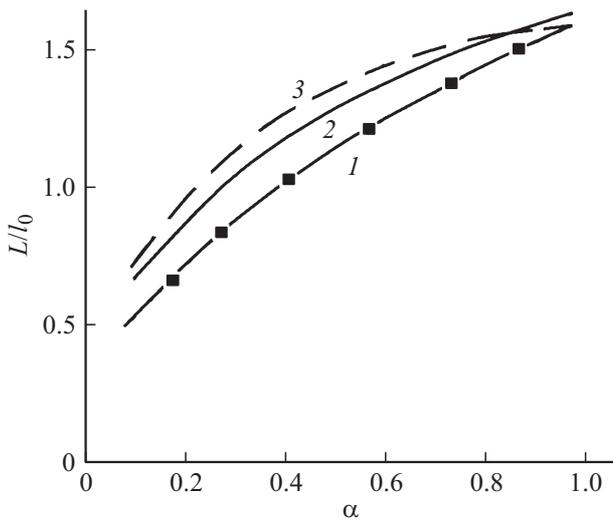


Рис. 4. Относительная глубина проникания ударников в зависимости от пористости материала.

проникать в преграду глубже. Эффект уменьшения диаметра кратера в случае проникания пористых ударников в сравнении с ударниками из монолитного материала отмечается и в [4,5].

По результатам оценок (система уравнений (1)) и литературных данных [5,16] проведен сравнительный анализ проникающей способности ударников из вольфрама различной пористости. В соответствии с гидродинамической теорией проникания (модель несжимаемой жидкости) [16] без учета прочностных характеристик взаимодействующих материалов глубина проникания определяется зависимостью:

$$L/l_0 = \sqrt{\rho_{00}/\rho_t} = \sqrt{\alpha} \sqrt{\rho_0/\rho_t}. \quad (2)$$

В работе [5] предложено простое аналитическое соотношение для оценки глубины проникания пористого ударника в виде

$$L/l_0 = \sqrt{(2-\alpha)}\sqrt{\alpha}\sqrt{\rho_0/\rho_t}. \quad (3)$$

Проведен сравнительный анализ результатов расчетов по рассмотренным методикам. На рис. 4 представлены графические зависимости относительной глубины проникания ударников в зависимости от пористости материала при скорости взаимодействия 4000 м/с. Кривая 1 получена по гидродинамической модели (соотношение (2)), кривая 2 характеризует прогноз глубины проникания по имитационной модели (система уравнений (1)), кривая 3 отражает зависимость, полученную по аналитическому соотношению (3).

В общем случае наблюдается тенденция увеличения проникающей способности ударников с уменьшением пористости материала (α стремится к единице). Соотношения (2) и (3), полученные по представлениям гидродинамической теории проникания, в первом приближении будут справедливы для сверхвысоких скоростей

соударения (кривые 1 и 3). Имитационная модель (1) в отличие от гидродинамической теории проникания учитывает прочностные характеристики материалов. Можно отметить удовлетворительное согласование результатов, полученных по соотношениям (1) и (3) — кривые 2 и 3 соответственно. Тем не менее наблюдается различие полученных результатов: кривая 3 стремится к гидродинамическому пределу проникания, а кривая 2, рассчитанная по модели (1), его превышает. Этот факт подтвержден экспериментальными исследованиями по внедрению стержневых ударников в преграды при сверхвысоких скоростях удара [21].

Таким образом, разработанная методика на основе модифицированной гидродинамической модели с учетом ударной сжимаемости материала ударника позволяет оценить интегральные параметры проникания стержневых ударников из пористых материалов. Результаты расчетов свидетельствуют об усилении проникающей способности высокопористых ударников в сравнении с монолитными при равенстве их массы и диаметра и при достаточно высоких скоростях удара. Этот эффект объясняется ускоренным образованием локализованных полос сдвига с последующим отделением фрагментов материала пористого ударника в сравнении с процессом проникания монолитных ударников.

Финансирование работы

В работе использованы результаты расчетов, полученные в ходе выполнения проекта № 8.2.09.2018 „Программа повышения конкурентоспособности Томского государственного университета“ и в рамках выполнения госзадания Томского научного центра Сибирского отделения Российской академии наук, проект № 0365-2018-0003. Экспериментальные результаты получены при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках проекта № 16-19-10264.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Григорян В.А., Белобородько А.Н., Дорохов Н.С., Кобылкин И.Ф., Коновалов А.В., Маринин В.М., Соколов И.В. Частные вопросы конечной баллистики / Под ред. В.А. Григоряна. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 592 с.
- [2] Черняк Г.Б., Поварова К.Б. Вольфрам в боеприпасах / Под ред. И.Н. Торгуна. М.: ГНЦ РФ ФГУП „ЦНИИХМ“, 2014. 355 с.
- [3] Герасимов А.В., Глазырин В.П., Зелепугин С.А., Коняев А.А., Орлов Ю.Н., Пашков С.В., Толкачев В.Ф., Трушков В.Г., Христенко Ю.Ф. Высокоскоростной удар. Моделирование и эксперимент / Под ред. А.В. Герасимова. Томск: Изд-во НТЛ, 2016. 568 с.

- [4] Афанасьева С.А., Белов Н.Н., Козорезов К.И., Табаченко А.Н., Хабибуллин М.В., Югов Н.Т. // ДАН. 1997. Т. 355. № 2. С. 192–195. [Afanas'eva S.A., Belov N.N., Khabibullin M.V., Yugov N.T., Kozorezov K.I. // Phys. Dok. 1997. Vol. 42. N 7. P. 381–384.]
- [5] Федоров С.В. // ЖТФ. 2007. Т. 77. Вып. 10. С. 131–134. [Fedorov S.V. // Tech. Phys. 2007. Vol. 52. N 10. P. 1379–1382. DOI: 10.1134/S1063784207100234]
- [6] Ben-Dor G., Dubinsky A., Elperin T. // Mechanics Based Design of Structures and Machines. 2007. Vol. 35. N 4. P. 481–496. DOI: 10.1080/15397730701686959
- [7] Федоров С.В., Бабкин А.В., Велданов В.А., Гладков Н.А., Ладов С.В. // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2016. № 5 (68). С. 18–32. DOI: 10.18698/1812-3368-2016-5-18-32
- [8] Ищенко А.Н., Афанасьева С.А., Белов Н.Н., Буркин В.В., Рogaев К.С., Саммель А.Ю., Скосырский А.Б., Табаченко А.Н., Югов Н.Т. // Письма в ЖТФ. 2017. Т. 43. Вып. 17. С. 41–47. DOI: 10.21883/PJTF.2017.17.44945.16755 [Ishchenko A.N., Afanas'eva S.A., Belov N.N., Burkin V.V., Rogaev K.S., Sammel' A.Yu., Skosyrskii A.B., Tabachenko A.N., Yugov N.T. // Tech. Phys. Lett. 2017. Vol. 43. N 9. P. 796–799. DOI: 10.1134/S1063785017090024]
- [9] Зельдович Я.Б. // ЖЭТФ. 1957. Т. 32. № 6. С. 1577–1578.
- [10] Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Физматлит, 2008. 656 с. [Zel'dovich Ya.B., Raizer Yu.P. Physics of shock waves and high-temperature hydrodynamic phenomena. NY: Mineola, 2002. 944 p.]
- [11] Ударные волны и экстремальные состояния вещества / Под ред. В.Е. Фортова, Л.В. Альтшулера, Р.Ф. Трунина, А.И. Фунтикова. М.: Наука, 2000. 425 с.
- [12] Румянцев Б.В., Михайлин А.И. // Письма в ЖТФ. 2018. Т. 44. Вып. 3. С. 62–68. DOI: 10.21883/PJTF.2018.03.45580.16970 [Rumyantsev B.V., Mikhailin A.I. // Tech. Phys. Lett. 2018. Vol. 44. N 2. P. 115–117. DOI: 10.1134/S1063785018020128]
- [13] Савельева Н.В., Баяндин Ю.В., Савиных А.С., Гаркушин Г.В., Разоренов С.В., Наймарк О.Б. // Письма в ЖТФ. 2018. Т. 44. Вып. 18. С. 39–46. DOI: 10.21883/PJTF.2018.18.46610.17411 [Saveleva N.V., Bayandin Yu.V., Savinykh A.S., Garkushin G.V., Razorenov S.V., Naimark O.B. // Tech. Phys. Lett. 2018. Vol. 44. N 9. P. 823–826. DOI: 10.1134/S1063785018090286]
- [14] Власов А.С., Синани А.Б. // ЖТФ. 2017. Т. 87. Вып. 7. С. 1033–1039. DOI: 10.21883/JTF.2017.07.44674.1992 [Vlasov A.S., Sinani A.B. // Tech. Phys. 2017. Vol. 62. N 7. P. 1049–1055. DOI: 10.1134/S106378421707026X]
- [15] Румянцев Б.В. // Письма в ЖТФ. 2016. Т. 42. Вып. 17. С. 87–94. [Rumyantsev B.V. // Tech. Phys. Lett. 2016. Vol. 42. N 9. P. 923–926. DOI: 10.1134/S1063785016090078]
- [16] Лаврентьев М.А. // Успехи математических наук. 1957. Т. 12. Вып. 4. С. 41–56.
- [17] Алексеевский В.П. // Физика горения и взрыва. 1966. Т. 2. № 2. С. 99–106. [Alekseevskii V.P. // Combustion, Explosion, and Shock Waves. 1966. Vol. 2. N 2. P. 63–66. DOI: 10.1007/bf00749237]
- [18] Сагомоян А.Я. Проникание. М.: Из-во МГУ, 1974. 300 с.
- [19] Экспериментальные данные по ударно-волновому сжатию и адиабатическому расширению конденсированных веществ / Под ред. Трунина Р.Ф. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2006. 531 с.
- [20] Высокоскоростные ударные явления / Под ред. В.Н. Николаевского. М.: Мир, 1973. 533 с.
- [21] Perez E. // Science et Techniques de l'Armement. 1982. Vol. 56. P. 1–155.