

УДК 531.58:629.7.02
DOI: 10.15372/PMTF202315430

БАЛЛИСТИЧЕСКИЙ ПРЕДЕЛ ТОНКОЙ ПЛАСТИНЫ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С СОСТАВНЫМ УДАРНИКОМ

Ю. В. Попов, В. А. Марков, В. В. Селиванов

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана
(национальный исследовательский университет), Москва, Россия
E-mails: popovuv@bmstu.ru, markovva@bmstu.ru, selivanovvv@bmstu.ru

Исследовано ударное взаимодействие составных ударников с тонкими металлическими преградами, предложена методика оценки баллистического предела и остаточной скорости ударника. Составной цилиндрический ударник состоит из деформируемой носовой части, представляющей собой высокопористую среду, и жесткой недеформируемой хвостовой части. Скорость ударника рассматривалась в диапазоне $200 \div 850$ м/с. Задача решалась численно в двумерной осесимметричной постановке. Движение среды описывалось с использованием метода Лагранжа. Проведено сравнение с экспериментальными данными для подтверждения адекватности результатов расчета. Показано, что полученные результаты хорошо согласуются с результатами расчетов по известным аналитическим моделям и с экспериментальными данными.

Ключевые слова: баллистический предел, летательный аппарат, тонкая преграда, деформируемый ударник, высокопористая среда, объемно перфорированные образцы

Введение. В настоящее время актуальной задачей является защита критически важных объектов от случайного или преднамеренного воздействия летательных аппаратов (ЛА). Целями подобных воздействий могут быть как массивные прочные железобетонные сооружения атомных электростанций (АЭС), так и тонкостенные оболочечные конструкции плавучих атомных теплоэлектростанций, нефтяных платформ, танкеров и т. д.

Подходы к анализу стойкости объектов указанных типов существенно различаются. Для защиты железобетонных сооружений, перемещения нагруженных элементов которых малы по сравнению с характерными размерами области нагружения, часто применяется подход Риеры. Данный подход, рассмотренный в работе [1], основан на представлении ЛА в виде жесткопластического стержня, взаимодействующего с жесткой стенкой. В настоящее время возможность падения самолета на сооружения АЭС предусмотрена российскими нормами [2] и международными правилами [3, 4].

Такой подход неприменим для тонкостенных металлических экранов, являющихся типовыми ограждающими конструкциями, поскольку при ударе ЛА они получают значительные перемещения.

Во всех ЛА имеется деформируемый носовой отсек, заполненный бортовой аппаратурой. Таким образом, ЛА при высокоскоростном ударе можно представить в виде составного ударника (рис. 1, a), который имеет деформируемый носовой отсек и недеформируемую хвостовую часть.

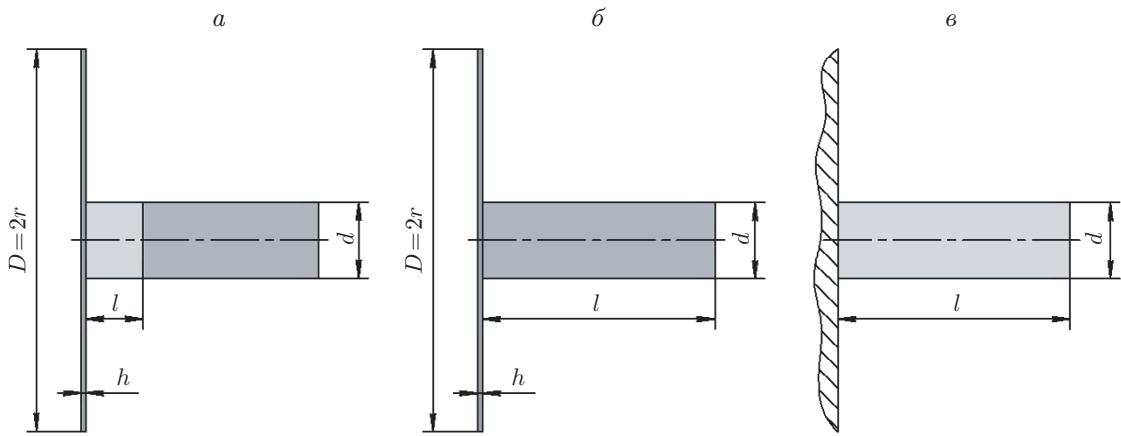


Рис. 1. Модели ударного взаимодействия составного ударника (а) и цилиндрического ударника с плоским торцом (б) с тонкой преградой, а также деформируемого цилиндрического ударника с жесткой стенкой (в)

Геометрические параметры ударника и преграды, а также экспериментальные и расчетные значения скорости

№ п/п	Материал преграды	Цилиндр		Пластина		V_{E1} , м/с	V_{E2} , м/с	V_{C1} , м/с	V_{C2} , м/с
		l , мм	d , мм	h , мм	r , мм				
1	Сталь HY-100	268	30,8	5,3	152,5	84	99	86	87
2		25	12,7	3,18	44,5	170	180	179	180
3	Сталь BS 970	51	12,7	3,18	44,5	108	124	116	117
4		102	12,7	3,18	44,5	70	90	76	77
5	Сталь BS15GD1	102	25,4	6,35	152,5	136	157	136	137

В данной работе приводятся постановка и решение задачи определения баллистического предела и построения баллистической кривой при пробитии тонкой преграды составным ударником.

При анализе процесса пробивания преграды составным ударником исследуются две задачи: деформирование (разрушение) преграды (рис. 1, б) и деформирование механических эквивалентов бортовой аппаратуры носового отсека ЛА (рис. 1, в). Обе задачи решались в двумерной осесимметричной постановке. Движение среды описывалось методом Лагранжа. Для верификации предложенных моделей были решены тестовые задачи.

1. Деформирование и разрушение тонкой преграды при высокоскоростном ударе. При решении первой задачи рассматривалось ударное взаимодействие цилиндрического ударника с плоским торцом и тонкой, закрепленной по контуру металлической преграды (см. рис. 1, б). С использованием экспериментальных данных моделировались ударники и преграды различных размеров, изготовленные из различных материалов [5, 6]. Размеры и характеристики материалов ударника и преграды приведены в таблице (V_{E1} , V_{C1} — экспериментальные [5, 6] и полученные с помощью численного расчета максимальные скорости цилиндра, при которых еще не происходит разрушение преграды, V_{E2} , V_{C2} — экспериментальные [5, 6] и полученные с помощью численного расчета минимальные скорости цилиндра, при которых происходит разрушение и полное пробитие преграды).

В работе [5] для одного из выстрелов (начальная скорость $V_s = 246$ м/с, остаточная скорость ударника $V_r = 229$ м/с) получена кинограмма процесса пробития преграды. Данная кинограмма в сравнении с результатами численного моделирования показана на

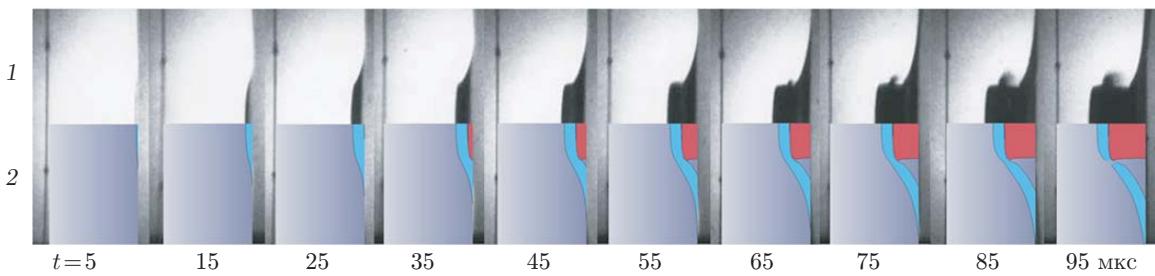


Рис. 2. Экспериментальные данные [5] (1) и результаты моделирования процесса пробития преграды (2)

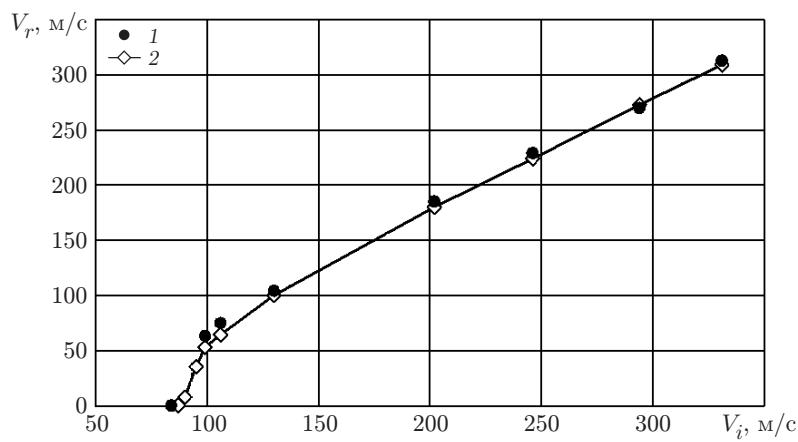


Рис. 3. Экспериментальная (1) и расчетная (2) зависимости остаточной скорости ударника от начальной скорости при пробитии пластины из стали НУ-100

рис. 2 [5]. Следует отметить, что в эксперименте материал преграды начинает разрушаться раньше, чем в модели, о чем свидетельствует характерное облако частиц, возникающих при полном пробитии преграды ($t = 65$ мкс). В расчете разрушение преграды также происходит путем среза пробки, но в другой момент времени, поэтому форма купола, полученная в расчете, отличается от результатов эксперимента.

Однако при проведении сравнения баллистических кривых (зависимости остаточной скорости ударника от начальной скорости), полученных экспериментально [5] и в результате расчета, видно, что они хорошо согласуются (рис. 3). При скоростях, близких к баллистическому пределу, отклонение расчетной остаточной скорости от полученной в эксперименте составляет 15–16 %, при больших скоростях — 1–4 %, при этом значение баллистического предела находится в экспериментально полученном диапазоне.

Для моделей, построенных с использованием экспериментальных данных [6], рассчитанные значения баллистического предела также находятся в экспериментально полученном интервале между значениями скорости непробития V_{E1} и скорости пробития V_{E2} (см. таблицу).

2. Высокоскоростное деформирование механических эквивалентов носового отсека. Исследовано деформирование механических эквивалентов бортовой аппаратуры в виде объемно перфорированных ударников из алюминиевого сплава Д16Т (рис. 4) при ударе о жесткую стенку (тест Тейлора) [1]. Объемно перфорированные образцы имели следующие характеристики: образец 1 — $d = 2,0$ мм, $z = 4,1$ мм, $\rho = 576$ кг/м³, $\alpha_0 = 4,83$, образец 2 — $d = 2,0$ мм, $z = 4,3$ мм, $\rho = 737$ кг/м³, $\alpha_0 = 3,77$, образец 3 — $d = 2,0$ мм,

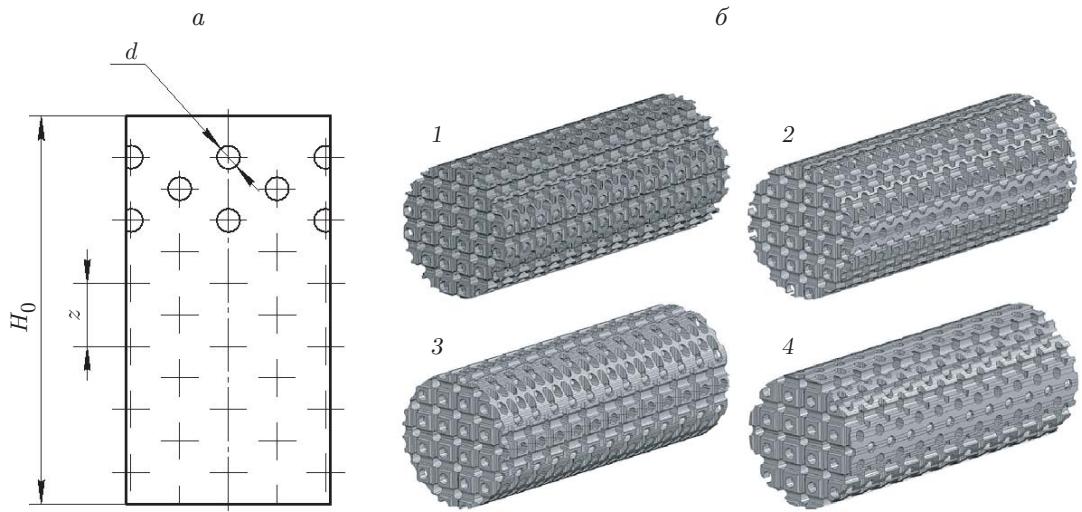


Рис. 4. Схема образца (a) и расчетные модели объемно перфорированных образцов при прямом моделировании пористости в тестах Тейлора (b):
 1 — образец 1, 2 — образец 2, 3 — образец 3, 4 — образец 4

$z = 4,8$ мм, $\rho = 1073$ кг/м³, $\alpha_0 = 2,59$, образец 4 — $d = 2,0$ мм, $z = 5,2$ мм, $\rho = 1287$ кг/м³, $\alpha_0 = 2,16$.

В настоящей работе на основе полученных ранее результатов испытаний на одноосное сжатие и результатов численного моделирования [1, 7] предложена эквивалентная гомогенная модель пористой среды. В численном или натурном эксперименте для образца необходимо получить зависимость нормального напряжения от объемной деформации. Напряженно-деформированное состояние пористого материала остается одноосным. При этом гидростатическое давление и предел текучести вычисляются по формулам

$$p(\varepsilon_v) = -\sigma_x(\varepsilon_v)/3, \quad \sigma_t = \sigma_x(\varepsilon_v),$$

где ε_v — объемная деформация. Предел текучести ограничен значением $\sigma_t \leq \sigma_t^m/\alpha_0$, где σ_t^m — максимальный предел текучести матричного алюминиевого сплава (с учетом деформационного упрочнения); α_0 — пористость.

В результате была получена картина деформирования ударника практически без радиального расширения, которая в ряде случаев хорошо согласуется с картиной, полученной при моделировании с геометрически заданной пористостью. На рис. 5 представлены результаты, полученные по предлагаемой гомогенной модели, а также результаты, полученные в случае геометрически заданной пористости для объемно перфорированных образцов. В 2D-расчете по гомогенной модели значения осевых деформаций оказываются заниженными, особенно для образцов с малой плотностью (576 кг/м³), так как в этом случае длина образцов при ударе о жесткую стенку уменьшается не только за счет их осевого сжатия, но и за счет радиального расширения в зоне, примыкающей к преграде. Однако данная модель достаточно точно описывает деформирование образцов с плотностью более 737 кг/м³.

Полученная относительная остаточная длина образца (отношение остаточной длины образца к его начальной длине) сравнивалась с результатами экспериментов и численного моделирования [7] в 3D-постановке с явно заданной пористостью (рис. 6).

В целом полученные результаты удовлетворительно согласуются с результатами экспериментов и численного моделирования в 3D-постановке с геометрически заданной пористостью [8]. Некоторое различие с экспериментальными данными обусловлено тем, что

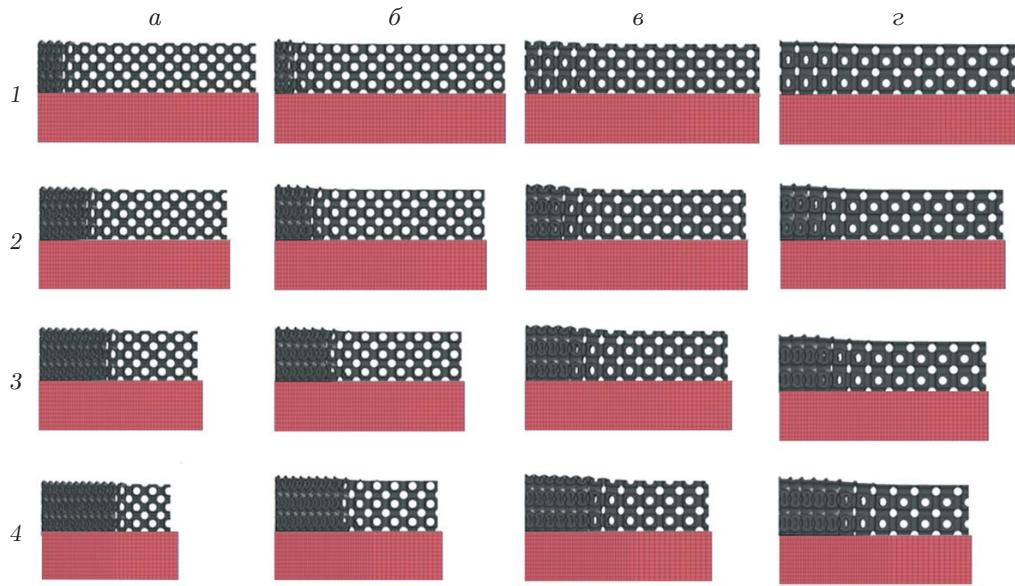


Рис. 5. Картинки деформирования образцов в teste Тейлора, полученные при геометрически заданной пористости (*вверху*) и с использованием гомогенной модели (*внизу*):

a — образец 1, *b* — образец 2, *c* — образец 3, *d* — образец 4; 1 — $V_0 = 100$ м/с, 2 — $V_0 = 150$ м/с, 3 — $V_0 = 200$ м/с, 4 — $V_0 = 250$ м/с

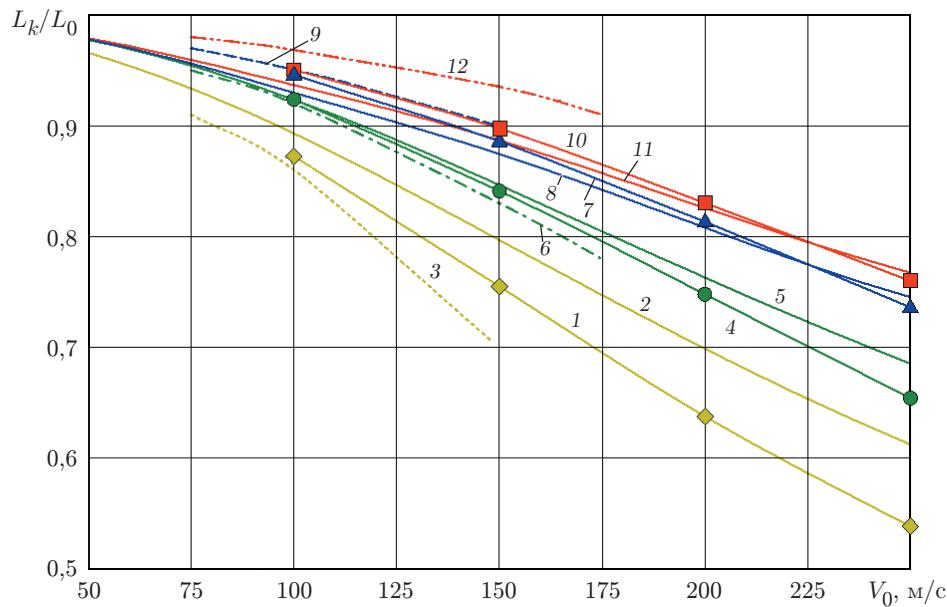


Рис. 6. Зависимости относительной остаточной длины образца от начальной скорости, полученные экспериментально и в результате численного моделирования при геометрически заданной пористости и по предложенной гомогенной модели:

1–3 — образец 1 (1 — $\alpha_0 = 4,83$, 2 — $\alpha_0 = 4,83$, 3 — $\alpha_0 = 4,91$), 4–6 — образец 2 (4 — $\alpha_0 = 3,77$, 5 — $\alpha_0 = 3,77$, 6 — $\alpha_0 = 3,78$), 7–9 — образец 3 (7 — $\alpha_0 = 2,59$, 8 — $\alpha_0 = 2,59$, 9 — $\alpha_0 = 3,31$), 10–12 — образец 4 (10 — $\alpha_0 = 2,16$, 11 — $\alpha_0 = 2,16$, 12 — $\alpha_0 = 2,12$); 1, 4, 7, 10 — результаты 3D-расчета, 2, 5, 8, 11 — результаты 2D-расчета, 3, 6, 9, 12 — экспериментальные данные

ввиду особенностей технологии изготовления экспериментальных образцов их средняя плотность, а значит, и начальная пористость отличались от соответствующих значений, полученных по моделям, которые использовались при решении задачи с геометрически заданной пористостью в пакете программ LS-DYNA.

3. Взаимодействие составного ударника с тонкой преградой. Рассматривается взаимодействие составного ударника с тонким металлическим защитным экраном (см. рис. 1, б). Тонкими являются преграды, имеющие относительную толщину $h/d < 0,5$. Рассматриваемый ударник состоит из двух частей: деформируемого носового отсека и недеформируемого хвостового отсека. Носовой отсек в реальных ЛА содержит бортовую радиолокационную станцию или головку самонаведения и другое бортовое радиоэлектронное оборудование. В качестве механического эквивалента носового отсека ЛА используется цилиндрический ударник, изготовленный из высокопористого алюминиевого сплава. За носовым отсеком обычно располагаются другие отсеки, которые в данной работе объединены в хвостовой отсек и считаются недеформируемыми. Предложенная модель верифицировалась по экспериментальным данным работы [8].

Для описания преграды использована приведенная в [9] модель для стали HSS (модель Купера — Саймондса). Механические свойства этой стали близки к механическим свойствам рассмотренной в [8] стали 902. Деформируемый носовой отсек представлен в виде однородного стержня, для описания его деформирования использована предложенная гомогенная модель. Вследствие отсутствия в работе [8] данных о механических свойствах механического эквивалента носового отсека была использована модель “половых сфер” Кэрролла — Холта [10], что позволило получить диаграмму деформирования. Хвостовой отсек представлен в виде недеформируемого стержня с массой, соответствующей образцам, используемым в работе [8].

Результаты расчетов сравнивались с известными экспериментальными данными [8] и аналитическими зависимостями (рис. 7), которые с различной степенью точности поз-

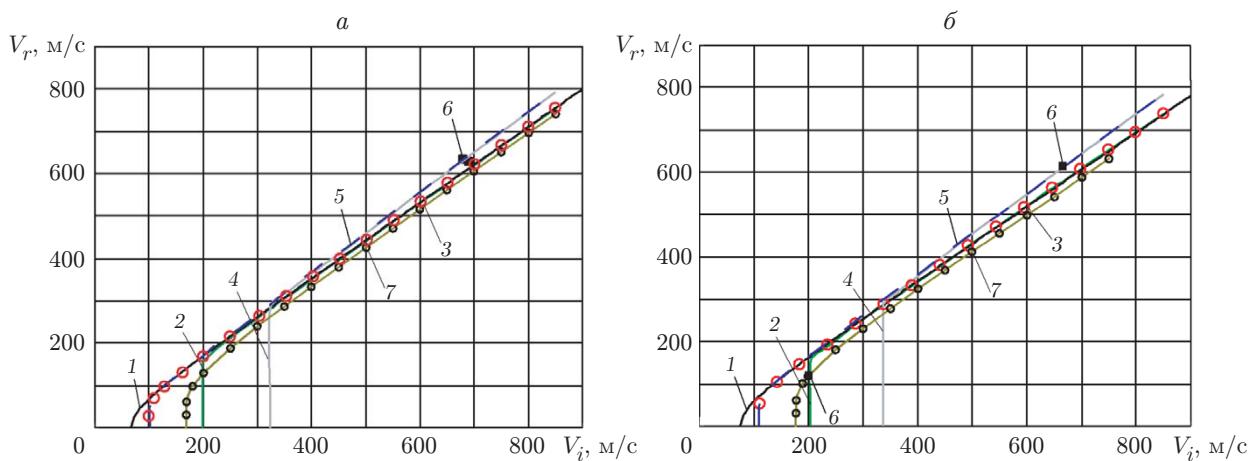


Рис. 7. Зависимость остаточной скорости от начальной скорости при пробитии металлических преград:

1 — расчет по предложенной в [11] аналитической методике, 2 — расчет по методике [8] для преград средней толщины и ударника без деформируемого носового отсека, 3 — расчет по методике [8] для тонких преград и ударника без деформируемого носового отсека, 4 — расчет по методике [8] для преград средней толщины и ударника с деформируемым носовым отсеком, 5 — расчет по методике [8] для тонких преград и ударника с деформируемым носовым отсеком, 6 — эксперимент [8], 7 — численное моделирование для составных ударников диаметром 155 мм (а) и диаметром 80 мм (б)

воляют описать баллистические кривые при пробитии металлических преград. Использовались подходы к анализу пробития тонких и средних преград ударником, содержащим деформируемый носовой отсек и не содержащим его, предложенные в работе [8], а также подход к анализу пробития тонких преград деформируемым ударником, представленный в [11].

Заключение. Результаты расчетов по предложенной гомогенной модели пористой среды хорошо согласуются с результатами, полученными в работах [8, 9]. Основные различия наблюдаются при скоростях, близких к баллистическому пределу. Исследование этого диапазона скоростей с использованием аналитических методик существенно затруднено, так как при этом необходимо учитывать относительную толщину преграды, параметры закрепления, механические свойства преграды и форму ударника.

Полученное численное решение хорошо согласуется с известными аналитическими решениями и экспериментальными данными. Начальный участок баллистической кривой воспроизводится наиболее точно при скоростях, близких к баллистическому пределу. При скоростях удара более 400 м/с отклонение остаточной скорости от наблюдаемой экспериментально, составляющее 5–10 %, можно считать удовлетворительным. Основной причиной различий, возникающих при больших значениях скорости, является отличие реальных механических характеристик механического эквивалента носового отсека от характеристик, используемых в модели Кэрролла — Холта. В силу принятых допущений (материал матрицы полагался несжимаемым, не учитывались термодинамические эффекты и взаимодействие пор) модель “полых сфер” дает верхнюю оценку давления, реализуемого в пористой среде, что приводит к завышению диссипации энергии в носовом отсеке и занижению остаточной скорости составного ударника. Однако в случае отсутствия других данных о механических свойствах бортовой аппаратуры носового отсека данная оценка может быть использована при решении прикладных задач.

ЛИТЕРАТУРА

1. Попов Ю. В., Белов Г. В., Марков В. А. и др. Нагрузки, действующие на жесткую стенку, при ударе высокопористого цилиндра // ПМТФ. 2021. Т. 62, № 1. С. 187–192.
2. ПиН АЭ-5.6. Нормы строительного проектирования АС с реакторами различного типа. Правила и нормы в атомной энергетике: Утв. Мин-вом атом. энергетики СССР 29.12.1986. М.: Б. и., 1986.
3. External events excluding earthquakes in the design of nuclear power plant: safety guide / IAEA safety standards. Ser. NS-G-1.5. Vienna: IAEA, 2003. [Электрон. ресурс]. Режим доступа: http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1159_web.pdf.
4. External human-induced events in site evaluation for nuclear power plants: safety guide / IAEA safety standards. Ser. NS-G-3.1. Vienna: IAEA, 2002. [Электрон. ресурс]. Режим доступа: http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1126_scr.pdf.
5. Forrestal M. J., Hanchak S. J. Perforation experiments on HY-100 steel plates with 4340 Rc38 and maraging T-250 steel rod projectiles // Intern. J. Impact Engng. 1999. V. 22, N 9/10. P. 923–933.
6. Lethaby J. W., Skidmore I. C. The deformation and plugging of thin plates by projectile impact // Mech. Properties High Rate Strain. Proc. Conf. Oxford. 1974. V. 21. P. 429–441.
7. Белов Г. В., Гусаров А. П., Марков В. А. и др. Применение теста Тейлора для исследования динамических механических свойств высокопористого алюминиевого сплава // Наука и образование. 2012. № 9. DOI: 10.7463/0912.0442058.
8. Chen X. W., Yang Y. H., Yang Y. B., et al. Perforation of metallic plates stuck by a blunt projectile with a soft nose // Intern. J. Impact Engng. 2008. V. 35, N 6. P. 549–558.

9. **Ye F., Liu J. H., Wang F. H.** Numerical simulation on performance of broadside protection structure subjected to semi-armor-piercing missile warhead // Chinese J. Ship Res. 2018. V. 13, N 3. P. 13–20.
10. **Carroll M. M., Holt A. C.** Static and dynamic pore-collapse relations for ductile porous materials // J. Appl. Phys. 1972. V. 43, N 4. P. 1626–1636.
11. **Pusev V. I., Kuslya A. M., Markov V. A., et al.** On the ballistic limit of an aerial vehicle impacting against a thin metal screen at a high velocity // AIP Conf. Proc. 2019. V. 2103, N 1. 020013. DOI: 10.1063/1.5099877.

Поступила в редакцию 15/XI 2023 г.,

после доработки — 15/XI 2023 г.

Принята к публикации 25/III 2024 г.