

УДК 539.3

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УДАРНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЖЕСТКОГО УДАРНИКА С КОМБИНИРОВАННОЙ ПРЕГРАДОЙ

В. В. Баландин, А. М. Брагов, С. В. Зефилов, А. К. Ломунов

НИИ механики Нижегородского государственного университета им. Н. И. Лобачевского
603950 Нижний Новгород, zefirov@mech.unn.ru

Проведено экспериментальное и численное исследование конструкций, применяемых для защиты от поражающего действия пулевыми и осколочными элементами. Среди них особое место занимают разнесенные конструкции, в которых промежуток между слоями заполнен либо воздухом, либо различными легкими материалами с хорошими демпфирующими, диссипативными и теплофизическими свойствами. Результаты численного моделирования фрагмента разнесенной защиты хорошо соответствуют экспериментальным данным как по остаточным формам, так и по величине прогибов.

Ключевые слова: легковесная защита, динамическая сжимаемость, стержень Гопкинсона, контактное взаимодействие, удар и проникание, переинтерполяция физических полей.

DOI 10.15372/FGV20170116

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Конструкция легковесной защиты состояла из двух титановых пластин толщиной 4 мм с промежутком между ними 10 мм. В одном из конструктивных вариантов защиты воздушный промежуток между пластинами заполнялся демпфирующим материалом — шамотом. Опыты проводили на баллистической установке. Ударник в форме шара разгонялся до требуемой скорости и наносил удар по комбинированной преграде. Скорость ударника измеряли с помощью электромагнитного датчика. Начальные скорости удара варьировались [1]. Анализ экспериментальных результатов показал, что пробитие первой титановой пластины происходит с разрушением по типу выбивания пробки; вторая титановая пластина деформируется с образованием кратера; шамот в процессе нагружения волной сжатия разрушается с образованием порошка с размером частиц $\Delta = 0.1$ мм; ударник во всех опытах не разрушался.

Экспериментальное исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 15-19-10032), численное моделирование — при поддержке Российского научного фонда (проект № 16-19-10237) и частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 14-08-00197).

© Баландин В. В., Брагов А. М., Зефилов С. В., Ломунов А. К., 2017.

Шамот, имеющий высокую пористость и температуру плавления, рассматривается в качестве перспективного демпфера для ослабления ударных или взрывных нагрузок. Однако использование легковесного шамота в слоистых защитных конструкциях сдерживается отсутствием экспериментальной информации о его динамических свойствах. Химический состав шамота: $31 \div 35$ % Al_2O_3 , $1.5 \div 2$ % TiO_2 , $48 \div 55$ % SiO_2 , <2 % Fe_2O_3 , плотность $0.4 \cdot 10^3$ кг/м³. Испытуемые образцы были изготовлены в виде таблеток диаметром 20 мм и длиной 10 мм.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ ШАМОТА

Экспериментальное изучение динамической сжимаемости высокопористого шамота было выполнено с использованием метода Кольского и разрезного стержня Гопкинсона [2]. Для исследования диссипативных свойств материалов применяли оригинальные модификации стержня Гопкинсона: испытание образца в жесткой обойме в условиях одноосной деформации [3, 4], многоцикловое нагружение образца для получения значительной степени сжатия [5], нагружение с помощью полимерного опорного мерного стержня, оснащенного тензодатчиками, расположенными в непосредственной близости от образца. Последнее обстоятельство позволило пренебречь дисперси-

онными эффектами при распространении импульсов в вязкоупругом полимерном стержне. Вследствие очень низкой плотности шамота ($0.4 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$) и высокой пористости (более 80 %) отраженная волна составляет более 90 % от амплитуды падающей, поэтому образец подвергался множеству циклов нагрузка-разгрузка с постепенно убывающей амплитудой. Структурная прочность шамота очень низкая (менее 2 МПа), поэтому для достоверной регистрации прошедшего импульса малой амплитуды использовался полимерный опорный стержень (винипласт). Это позволило, к тому же, осуществить неискаженную регистрацию большого числа циклов нагрузки вследствие низкой скорости упругих волн в винипласте ($c = 1523 \text{ м/с}$). Использование полимерного опорного стержня [6] при испытаниях высокопористостого шамота в жесткой обойме позволило в одном эксперименте достоверно зарегистрировать пять циклов нагружения (рис. 1, 2). Поскольку достичь бóльшей степени

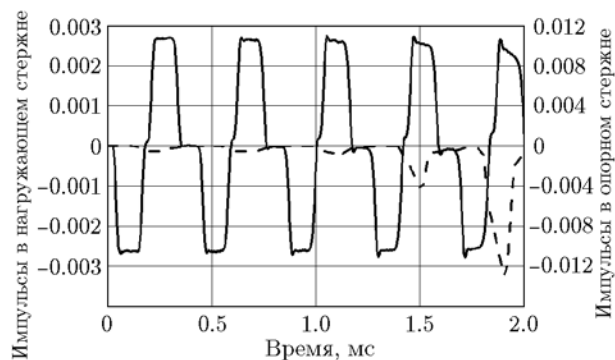


Рис. 1. Исходные импульсы в мерных стержнях

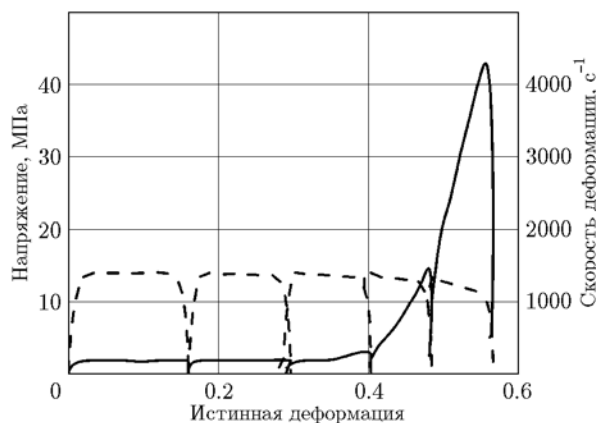


Рис. 2. Результирующая диаграмма шамота

сжатия и бóльших амплитуд нагрузки при использовании винипластового стержня не удается, испытанные образцы подвергали повторному нагружению, но уже с использованием опорного стержня из сплава Д16Т. Для того чтобы сохранить объем и конфигурацию испытанного образца при замене мерных стержней, при подготовке первого испытания исходную таблетку после помещения в обойму обкладывали с двух сторон кружками из тонкого (0.1 мм) электрокартона, которые не позволяли разрушенным при первом нагружении частицам образца высыпаться из обоймы. Полученная при таком двукратном нагружении образца шамота диаграмма представлена на рис. 3. Сплошной линией изображено основное многоцикловое нагружение через винипластовый опорный стержень. Видно, что диаграмма повторного нагружения (штриховая линия) неуклонно нарастает, а степень сжатия приближается к единице. Материал в результате испытания полностью разрушается и представляет собой не связанные между собой очень мелкие частицы. Повторное нагружение одного и того же образца большей амплитудой падающего импульса позволило добиться значительного уплотнения образца и практически полного закрытия пор. На начальном участке диаграммы (до деформации 55 %) происходят переупаковка частиц и схлопывание пор. Эти процессы протекают при малых амплитудах нагрузки. После полного удаления пор начинается процесс ударного сжатия порошкообразного материала, что при-

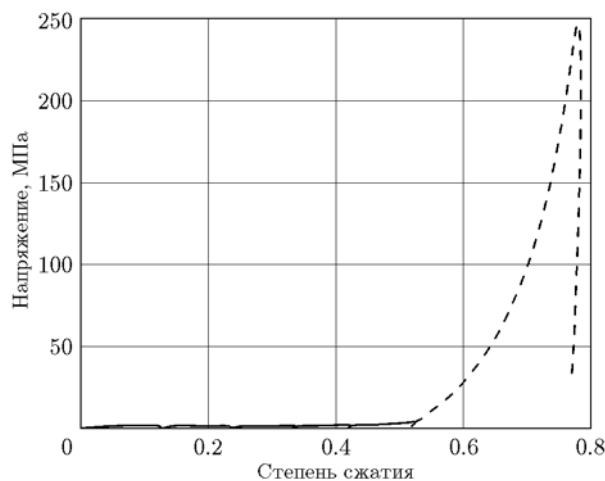


Рис. 3. Динамическая сжимаемость шамота ШЛ-04. Повторное нагружение одного и того же образца

водит к существенному росту напряжения, развиваемого в материале.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Решение задачи осуществлялось в осесимметричной постановке на основе вариационно-разностного метода, реализованного в пакете прикладных программ «Динамика-2» [7]. Движение среды описывается в переменных Лагранжа уравнениями, следующими из вариационного принципа Даламбера — Лагранжа в форме Журдена, в неподвижной цилиндрической r, β, z (Oz — ось вращения) системе координат:

$$\begin{aligned} & \iint_{\Omega} (\sigma_{rr} \delta \dot{e}_{rr} + \sigma_{\beta\beta} \delta \dot{e}_{\beta\beta} + \sigma_{zz} \delta \dot{e}_{zz} + \\ & + 2\sigma_{rz} \delta \dot{e}_{rz}) r d\Omega + \iint_{\Omega} \rho (\ddot{u}_r \delta \dot{u}_r + \ddot{u}_z \delta \dot{u}_z) r d\Omega - \\ & - \int_G (p_r \delta \dot{u}_r + p_z \delta \dot{u}_z) r dS - \\ & - \int_G (q_r \delta \dot{u}_r + q_z \delta \dot{u}_z) r dS = 0. \quad (1) \end{aligned}$$

Здесь $\sigma_{ij}, \dot{e}_{ij}$ — компоненты тензора напряжений Коши и скоростей деформаций, \dot{u}_α — скорость перемещений, p_α, q_α — компоненты поверхностной нагрузки и контактного давления ($\alpha = r, z$).

Учет геометрической нелинейности осуществляется поэтапной перестройкой конфигурации сеточной модели во времени. Связь тензора скоростей деформаций со скоростями перемещений определяется в метрике текущего состояния:

$$\begin{aligned} \dot{e}_{rr} &= \dot{u}_{r,r}, \quad \dot{e}_{\beta\beta} = \dot{u}_r r^{-1}, \quad \dot{e}_{zz} = \dot{u}_{z,z}, \\ \dot{e}_{rz} &= (\dot{u}_{z,r} + \dot{u}_{r,z})/2. \end{aligned}$$

Для описания упругопластических свойств материала используется вариант теории течения с нелинейным изотропным упрочнением. Предполагается, что скорость деформации можно представить в виде суммы скоростей упругих и пластических составляющих:

$$\dot{e}_{ij} = \dot{e}_{ij}^y + \dot{e}_{ij}^p.$$

Связь между скоростями девиатора напряжений $\dot{\sigma}'_{ij} = \dot{\sigma}_{ij} - \delta_{ij} \dot{\sigma}$ и упругих составляющих девиатора деформаций $\dot{e}'_{ij} = \dot{e}_{ij} - \delta_{ij} \dot{e}/3 - \dot{e}_{ij}^p$ определяется в виде

$$D_J \sigma'_{ij} = 2G \dot{e}'_{ij}, \quad D_J \sigma'_{ij} = \dot{\sigma}'_{ij} + \sigma'_{ik} \dot{\omega}_{kj} - \sigma'_{kj} \dot{\omega}_{ik},$$

где D_J — производная Яуманна, G — модуль сдвига, δ_{ij} — символ Кронекера, $\dot{\sigma}, \dot{e}$ — шаровые составляющие тензоров скоростей напряжений и деформаций, $\dot{\omega}_{ij}$ — компоненты тензора скоростей вращения как жесткого целого:

$$\dot{\omega}_{ij} = (\dot{u}_{i,j} - \dot{u}_{j,i})/2.$$

Связь между скоростями шаровых составляющих напряжений $\dot{\sigma}$ и деформаций \dot{e} полагается линейной:

$$\dot{\sigma} = K \dot{e}, \quad \dot{\sigma} = \dot{\sigma}_{ii}/3, \quad \dot{e} = \dot{e}_{ii}, \quad \dot{e}_{ii}^p = 0,$$

где K — модуль объемного сжатия.

Уравнение поверхности текучести, ограничивающей в пространстве девиаторов напряжений область упругих состояний, принимается в форме Мизеса. Скорости пластических составляющих деформации определяются ассоциированным законом течения:

$$\dot{e}_{ij}^p = \dot{\lambda} \sigma'_{ij}, \quad \sigma'_{ij} \sigma'_{ij} = (2/3) \sigma_T^2(\alpha).$$

Здесь $\sigma_T = \sigma_T(\chi)$ — радиус поверхности текучести ($\chi = \sqrt{2/3} \int_0^t \sqrt{\dot{e}_{ij}^p \dot{e}_{ij}^p} dt$ — параметр Од-квиста). Параметр $\dot{\lambda}$ определяется при пластическом деформировании из условия прохождения мгновенной поверхности текучести через конец вектора догрузки.

Решение определяющей системы уравнений при заданных начальных и граничных условиях проводится по явной конечно-разностной схеме интегрирования по времени типа крест. Пространственные производные аппроксимируются исходя из дивергентной схемы аппроксимации производных в предположении линейного изменения функции вдоль каждой из сторон четырехугольной элементарной ячейки. Перемещения и скорости перемещений определяются в узлах разностной сетки, а тензоры напряжений и скоростей деформаций — в центрах ячеек. В вариационном уравнении движения (1) компоненты контактного усилия

q_α ($\alpha = r, z$) заранее не известны и определяются в процессе решения задачи [8]. На контактных границах вводится местный координатный базис s, ξ , связанный с деформированной поверхностью. Здесь s — направление касательной, ξ — направление нормали к поверхности. Для определения сил контактного взаимодействия используются симметричные алгоритмы контакта на несовпадающих разностных сетках, обеспечивающие непроникание по нормали и проскальзывание вдоль касательной без учета и с учетом трения [8]. Для модели контакта с трением усилие по нормали определяется из условия непроникания:

$$\begin{cases} \dot{u}'_\xi = \dot{u}''_\xi, \\ q'_\xi = -q''_\xi, \end{cases} \quad q_\xi = q'_\xi = \begin{cases} 0, & q_\xi \geq 0, \\ q_\xi, & q_\xi < 0, \end{cases}$$

касательное усилие на первом этапе — из условия жесткой склейки, а в случае превышения силы трения покоя — в соответствии с законом Кулона:

$$\begin{cases} \dot{u}'_s = \dot{u}''_s, \\ q'_s = -q''_s, \end{cases} \quad q_s = q'_s = \begin{cases} q_s, & |q_s| \leq k_\xi |q_\xi|, \\ k_\xi |q_\xi| \text{sign}(q_s), & |q_s| > k_\xi |q_\xi|. \end{cases}$$

Связь контактирующих подобластей полагается односторонней, т. е. возможен отрыв поверхностей друг от друга и повторное вступление в контакт.

В расчетах процесс разрушения пластины моделировался по типу выбивания пробки, как это наблюдается в экспериментах. В качестве критерия разрушения использовался критерий прочности типа Писаренко — Лебедева:

$$\sigma_{\text{эксп}} = \chi \sigma_i + (1 - \zeta) \sigma_1 A^{1-I} < \sigma_p.$$

Здесь σ_i — интенсивность тензора напряжений, σ_1 — наибольшее главное напряжение, A — параметр неоднородности материала, I — коэффициент жесткости напряженного состояния:

$$I = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) / \sigma_i, \quad \zeta = \sigma_p / \sigma_{\text{сж}},$$

$\sigma_p, \sigma_{\text{сж}}$ — пределы прочности на растяжение и сжатие, определяемые на истинной диаграмме деформирования. Для определения наиболее

вероятного местоположения линии, вдоль которой происходит разрушение по типу выбивания пробки, были проведены предварительные расчеты с детальным анализом напряженно-деформированного состояния. С учетом этого назначалась контактная линия раздела пластины на две геометрические подобласти. В дальнейшем в процессе расчета вдоль этой линии вычислялись эквивалентные напряжения $\sigma_{\text{эксп}}$, входящие в критерий прочности типа Писаренко — Лебедева.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

В расчетах полагалось, что круглые пластины жестко заземлены по торцу. Ударник в виде шарика был изготовлен из стали со следующими механическими характеристиками: $K = 175$ ГПа, $G = 80.77$ ГПа, плотность $\rho = 7.8 \cdot 10^3$ кг/м³. Полагалось, что материал шарика в процессе деформирования работает в упругой области. Пластины были выполнены из титана марки ВТ-14 с характеристиками $K = 110$ ГПа, $G = 43$ ГПа, $\rho = 4.52 \cdot 10^3$ кг/м³, $\sigma_T = 0.9$ ГПа, $\sigma_B = 1$ ГПа, $\delta = 10$ %, $g = 0.333$ ГПа. Здесь σ_T — предел текучести, σ_B — предел временного сопротивления, δ — относительное удлинение, g — $1/3$ модуля упрочнения на диаграмме σ - e^p .

В табл. 1 приведены для сравнения результаты расчета и данные экспериментов для варианта конструктивной схемы с воздушным зазором между пластинами. Здесь $H^{\text{эксп}}$ — остаточный прогиб пластины в центре кратера, регистрируемый в эксперименте, $H^{\text{расч}}$ — расчетный максимальный прогиб тыльной стороны второй пластины на оси вращения.

Расчет процесса пробития защиты, когда промежуток между пластинами заполнялся демпфирующим материалом — шамотом, осуществлялся в два этапа. На первом этапе численное моделирование проводилось с учетом деформирования шамота до момента «пересжатия» ($t = 30$ мкс, см. рис. 4). На втором эта-

Таблица 1

$v_0, \text{ м/с}$	Вторая пластина	
	$H^{\text{эксп}}, \text{ мм}$	$H^{\text{расч}}, \text{ мм}$
471	7.5	8.1
518	9.7	9.1
537	10.9	9.5

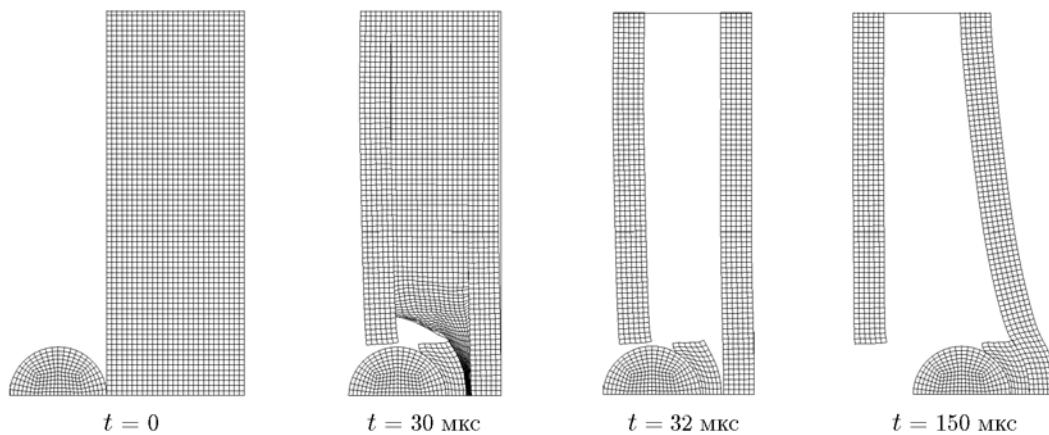


Рис. 4. Деформирование легковесной защиты с шамотом

Таблица 2

v_0 , м/с	Вторая пластина	
	$H^{\text{эксп}}$, мм	$H^{\text{расч}}$, мм
461	7.9	7.71
500	9.2	8.61
513	13.5	8.93
566	9.5	9.85
583	16.5	10.19

Таблица 3

v_0 , м/с	Материал		δ , %
	Д16Т	Титан	
461	11.76	7.71	52.5
500	12.78	8.61	48.4
513	13.15	8.93	47.3
566	14.70	9.85	49.2
583	15.13	10.19	48.5

пе влияние шамота на движение поражающего элемента (с пробкой) было незначительным и в расчетах им пренебрегали. Для численного моделирования второго этапа разработаны программные модули, осуществляющие перестройку базы данных задачи с одной расчетной схемы на другую с переносом и переинтерполяцией полей, характеризующих напряженно-деформированное состояние конструкции. Для описания процесса деформирования шамота использовалась модель пористой среды, в которой учитывается только нелинейная связь шаровых составляющих тензоров напряжений и деформаций, а сдвиговые деформации полагаются пренебрежимо малыми.

На рис. 4 представлены кинограммы деформирования разнесенной защиты с шамотом при численном моделировании с начальной скоростью соударения $v_0 = 513$ м/с.

В табл. 2 приведены для сравнения результаты расчета и данные экспериментов для варианта конструктивной схемы с шамотом между пластинами.

В расчетах оценивалось также влияние за-

мены титана в пластинах легковесной защиты на сплав Д16Т. Механические характеристики Д16Т: $K = 60.85$ ГПа, $G = 28.08$ ГПа, $\rho = 2.7 \cdot 10^3$ кг/м³, $\sigma_T = 0.475$ ГПа, $\sigma_B = 0.69$ ГПа, $\delta = 15$ %, $g = 0.48$ ГПа. Расчеты проводились с начальными скоростями ударника $v_0 = 461, 500, 513, 566, 583$ м/с. Результаты расчетов (максимальные прогибы второй пластины) представлены в табл. 3. Здесь δ — относительное увеличение максимального прогиба пластины из Д16Т по сравнению с титановой. Расчеты показывают, что прогибы второй пластины защиты из Д16Т примерно на 50 % превышают прогибы титановых пластин при всех начальных скоростях удара.

В расчетах оценивалось также влияние толщины каждой из титановых пластин на величину прогиба и остаточную баллистическую скорость при суммарной их толщине 8 мм. Толщины внешней (h_1) и внутренней (h_2) пластин варьировались в следующих сочетаниях:

- 1) $h_1 = 2$ мм, $h_2 = 6$ мм,
- 2) $h_1 = 3$ мм, $h_2 = 5$ мм,
- 3) $h_1 = 4$ мм, $h_2 = 4$ мм,

Таблица 4

$v_0, \text{ м/с}$	$\delta, \%$				
	$h_1 = 2$ $h_2 = 6$	$h_1 = 3$ $h_2 = 5$	$h_1 = 4$ $h_2 = 4$	$h_1 = 5$ $h_2 = 3$	$h_1 = 6$ $h_2 = 2$
461	5.20	6.42	7.76	8.72	10.37
500	5.82	7.17	8.83	9.85	11.47
513	6.00	7.39	8.92	10.20	11.76
566	6.76	8.24	9.92	11.37	13.14
583	7.01	8.52	10.21	11.65	13.51

Примечание. Значения h_1, h_2 даны в миллиметрах.

Таблица 5

$v_0, \text{ м/с}$	$v, \text{ м/с}$				
	$h_1 = 2$ $h_2 = 6$	$h_1 = 3$ $h_2 = 5$	$h_1 = 4$ $h_2 = 4$	$h_1 = 5$ $h_2 = 3$	$h_1 = 6$ $h_2 = 2$
461	420	330	266	238	202
500	439	350	346	254	223
513	443	360	349	260	240
566	490	449	414	274	251
583	530	460	420	280	270

Примечание. Значения h_1, h_2 даны в миллиметрах.

4) $h_1 = 5 \text{ мм}, h_2 = 3 \text{ мм},$

5) $h_1 = 6 \text{ мм}, h_2 = 2 \text{ мм}.$

При численном моделировании были использованы предыдущие результаты по определению наиболее вероятного местоположения линии, вдоль которой происходит разрушение по типу выбивания пробки. В табл. 4 сведены максимальные прогибы второй пластины, полученные во всех 25 вариантах расчета.

В табл. 5 приведены скорости в момент соударения поражающего элемента с лицевой поверхностью второй пластины во всех вариантах расчета. Минимальные прогибы второй пластины получаются для защиты с соотношением толщин $h_1 = 2 \text{ мм}, h_2 = 6 \text{ мм}.$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты численного моделирования фрагмента разнесенной защиты хорошо соответствуют экспериментальным данным по остаточным формам и величине прогиба.

ЛИТЕРАТУРА

1. Минеев В. Н., Фунтиков А. И., Фортос В. Е., Огородников В. А., Ерунов С. В., Хохлов Н. П., Михайлов А. Л., Брагов А. М., Садырин А. И., Баженов В. Г. Разнесенная защита с промежуток, заполненным керамическими материалами различного фракционного состава и пористости // Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны: тр. междунар. конф. «IX Харитоновские тематические научные чтения», Саров, 12–16 марта 2007. — С. 452–459.
2. Bragov A. M., Lomunov A. K. Methodological aspects of studying dynamic material properties using the Kolsky method // Intern. J. Impact Eng. — 1995. — V. 16, N 2. — P. 321–330.
3. Bragov A. M., Lomunov A. K. Use of the Kolsky method for studying shear resistance of soils // DYMAT J. — 1994. — V. 1, N 3. — P. 253–259.
4. Bragov A. M., Grushevsky G. M., Lomunov A. K. Use of the Kolsky method for confined tests of soft soils // Exper. Mech. — 1996. — V. 36, N 3. — P. 237–242.
5. Bragov A. M., Lomunov A. K., Sergeichev I. V. Modification of the Kolsky method for studying properties of low-density materials under high-velocity cyclic strain // J. Appl. Mech. Techn. Phys. — 2001. — V. 42, N 6. — P. 1090–1094.
6. Bragov A., Konstantinov A., Lomunov A., Sadyrin A., Sergeichev I., Kruszka L. Dynamic compressibility of high-porosity dampers of thermal and shock loadings: modeling and experiment // Intern. J. Modern Phys. B. — 2008. — V. 22, N 9/11. — P. 1183–1188.
7. Баженов В. Г., Зефирова С. В., Кочетков А. В., Крылов С. В. Пакет программ «Динамика-2» для решения плоских и осесимметричных задач нестационарного взаимодействия конструкций со сжимаемыми средами // Мат. моделирование. — 2000. — Т. 12, № 6. — С. 67–72.
8. Баженов В. Г., Зефирова С. В., Цветкова И. Н. Численное моделирование задач нестационарного контактного взаимодействия деформируемых конструкций // Прикладные проблемы прочности и пластичности. Численное моделирование физико-механических процессов: межвуз. сб. — М.: Товарищество научных изданий КМК, 1995. — Вып. 52. — С. 154–160.

Поступила в редакцию 8/VI 2015 г.,
в окончательном варианте — 15/II 2016 г.