

УДК 632.451.3+532.5

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУИ В ЛИНЕЙНЫХ КУМУЛЯТИВНЫХ ЗАРЯДАХ

А. Воеводка, Т. Витковски

Силезский технологический университет, 44-100 Гливице, Польша
andrzej.wojewodka@polsl.pl, tomasz.witkowski@polsl.pl

Эффективность линейных кумулятивных зарядов зависит от ряда параметров. Такие из них, как плотность и скорость детонации взрывчатого вещества, форма детонационной волны, форма и толщина стенки лайнера (кумулятивной оболочки), а также расстояние от кумулятивного заряда до мишени, могут быть оптимизированы путем компьютерного моделирования. В данной работе процесс формирования струи в линейном кумулятивном заряде и его воздействие на преграду моделировались программным пакетом LS-DYNA. Полученные результаты сопоставлены с экспериментом.

Ключевые слова: взрывчатое вещество, LS-DYNA, линейный кумулятивный заряд.

ВВЕДЕНИЕ

Воздействие на преграду заряда взрывчатого вещества (ВВ) с конической полостью внутри может быть значительно усилено за счет облицовки полости тонким слоем твердого материала. Этот слой называют лайнером, а полый заряд с лайнером — кумулятивным зарядом [1–4]. Обычно линейный кумулятивный заряд состоит из ВВ, лайнера и оболочки.

ВВ должно быть мощным, детонировать быстро и равномерно. Чтобы избежать пульсирующих волнообразных ударных фронтов на поверхностях лайнера, профиль давления должен быть гладким. Еще одним критерием выбора ВВ является термостойкость, которая определяет область применения кумулятивных зарядов. Должны приниматься во внимание требования безопасности: пониженная чувствительность к внешним воздействиям (электростатический заряд, трение, удар), стабильность, экологическая безопасность, а также экономические характеристики [5, 6].

Лайнеры изготавливаются из различных материалов: керамика [1], стекло [7], металлы (медь [8], свинец [9], алюминий [10], молибден [11], тантал [12]), сплавы (медь и вольфрам [13]) и металлические порошковые смеси (например, медь и вольфрам [14]). При выборе ВВ и формы лайнера руководствуются тем, чтобы энергия, передаваемая лайнеру, была максимальной, а потери в окружающую среду —

минимальными.

Оболочка изготавливается из наиболее подходящих материалов, таких как цинк, алюминий, сплав алюминия с цинком, сталь, в форме, которая обеспечивает формирование струи с необходимой энергией [1, 3, 4]. В [5] приведены характеристики ВВ (гексоген, октоген, тэн, тротил), наиболее часто используемых в кумулятивных зарядах.

Механизм формирования струи, основанный на модели идеальной несжимаемой жидкости и учитывающий данные экспериментов, развит независимо Лаврентьевым и Биркхоффом [15, 16] и использовался в ряде других работ [17–20]. Основные результаты гидродинамической теории, а также критерий образования струи, ее скорость и пробивная способность описаны в работе [21]. Эксперименты по исследованию влияния геометрии лайнера и заряда ВВ в линейной режущей системе проведены в [22]. Для описания кумуляции разработаны различные модели [23, 24]. Процесс сжатия в кумулятивных линейных зарядах и образование песта изучены в [25]. Исследовано также проникновение струи в однородные [26], многослойные [27] мишени и мишени с аксиальным отверстием [28].

МОДЕЛЬ ЛИНЕЙНОГО КУМУЛЯТИВНОГО ЗАРЯДА

Цель настоящей работы — разработка и экспериментальная проверка модели линейного кумулятивного заряда. Модель предназначена для определения оптимального расстояния

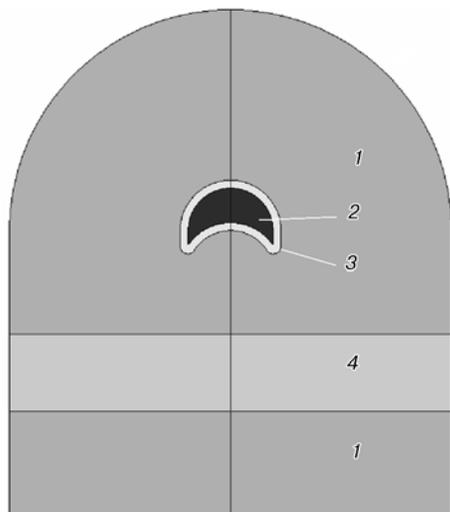


Рис. 1. Модель линейного кумулятивного заряда:

1 — воздух, 2 — ВВ, 3 — лайнер и оболочка, 4 — мишень

от кумулятивного заряда до мишени и, кроме того, для оптимизации кумулятивного заряда в зависимости от условий его применения. Рассматривается только одна геометрическая схема кумулятивного заряда (рис. 1), но нет ограничений как на материалы, используемые для лайнера и в качестве ВВ, так и на среду, окружающую заряд (обычно воздух). Размеры моделируемого кумулятивного заряда следующие: длина — 250 мм, максимальная ширина по внешнему контуру — 26 мм, толщина лайнера — 2.5 мм, высота лайнера — 6 мм. Лайнер и оболочка выполнены из меди, взрывчатое вещество — гексоген с политетрафторэтиленом (флегматизатор). Мишень, толщина которой 20 мм, подобрана так, чтобы струя отрезала часть мишени. Моделируемая и экспериментальная постановки одинаковы (см. рис. 1).

РАССТОЯНИЕ ОТ ЛИНЕЙНОГО КУМУЛЯТИВНОГО ЗАРЯДА ДО МИШЕНИ

Расстояние от линейного кумулятивного заряда до мишени (фокусное расстояние) — важный параметр. При его надлежащем выборе можно максимизировать энергию, передаваемую мишени струей, и минимизировать потери энергии в окружающую струю. На практике расстояние от лайнера до мишени выбирается в соответствии с калибром заряда. Однако обычное мнение о том, что расстояние от линейного кумулятивного заряда до мишени

должно быть равно его калибру, является лишь грубым приближением и не приводит к максимуму энергии, передаваемой струей в мишень. На фокусное расстояние влияют геометрия и материал лайнера, тип ВВ (при выборе ВВ следует учитывать условия его использования), а также окружающая обстановка.

ОПИСАНИЕ ПРОЦЕДУРЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

В данной работе моделирование линейного кумулятивного заряда проведено при помощи программного пакета LS-DYNA, в котором использован метод Лагранжа — Эйлера (*ALE_MULTI-MATERIAL_GROUP). В этом методе для узлов ячеек твердого вещества применяется лагранжев алгоритм и узлы движутся при деформации вещества. Для описания поведения материалов использованы следующие модели и уравнения состояния:

— для горения ВВ и продуктов детонации: *MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN и уравнение Джонса — Уилкинса — Ли (*EOS_JWL) (табл. 1) [18],

— для металлов: уравнение Джонсона — Кука (*MAT_JOHNSON_COOK) и линейный полином (*EOS_LINEAR_POLYNOMIAL) (табл. 2, 3),

— для воздуха: *MAT_NULL и линейный полином (*EOS_LINEAR_POLYNOMIAL) (табл. 3).

Предполагалось, что детонация инициируется в одной точке на границе ВВ.

При моделировании детонации количество выделившейся энергии контролируется горением фракций. Модель горения ВВ описывает процесс вплоть до образования продуктов детонации, тогда как уравнение состояния продуктов описывает процессы после детонации ВВ. В начальной фазе время инициирования реакции — это время, которое требуется детонационной волне для пробега от точки инициирования до центра элемента. При множестве точек инициирования детонации выбирается точка, находящаяся на наименьшем расстоянии от данного элемента. Если в ходе расчета в каком-либо элементе доля прореагировавшего ВВ больше 1, то она уменьшается до 1. Обычно необходимо несколько шагов, чтобы получить долю прореагировавшего вещества, равную 1. Непрореагировавшее ВВ может моделироваться как идеально-пластический материал [29].

Уравнение состояния для продуктов взрыва конденсированных ВВ обычно строится сле-

Таблица 1

Параметры уравнения состояния JWL и модели горения гексогена, флегматизированного политетрафторэтиленом (1.5 % к массе ВВ)

ρ_0 , кг/см ³	D , м/с	P_{CJ} , ГПа	E_0 , ГПа	A , ГПа	B , ГПа	R_1	R_2	ω
1.743	8 490	31.400	10.100	908.47	19.108	4.920	1.410	0.310

Таблица 2

Параметры модели Джонсона — Кука, описывающей объединенный материал лайнера и оболочки кумулятивного заряда и материал преграды

Материал	ρ_0 , г/см ³	A	B	C	n	m	T_r , К	T_m , К
Медь	8.96	0.085	0.293	0.026	0.31	1.05	293	1 356
Сталь	7.86	0.350	0.275	0.022	0.36	1.00	293	1 829

Таблица 3

Параметры линейных полиномиальных уравнений состояния, описывающих объединенный материал лайнера и оболочки кумулятивного заряда, материал преграды и воздух

Материал	C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	E_0 , ГПа
Медь	—	140.70	287.10	233.50	—	—	—	—
Сталь	—	164.289	—	—	—	—	—	—
Воздух	-0.0001	—	—	—	0.40	0.40	—	$2.48 \cdot 10^{-4}$

дующим образом:

$$p = p_x(\rho) + p_T(\rho, T), \quad (1)$$

$$E = E_x(\rho) + E_T(\rho, T), \quad (2)$$

где p — давление, E — внутренняя энергия, ρ — плотность, T — температура, индексы “х” и “Т” относятся к холодным и тепловым членам уравнения состояния соответственно.

Давление $p_x(\rho)$ связано с энергией $E_x(\rho)$ уравнением

$$p_x = -\frac{dE_x}{dv} = \rho^2 \frac{dE}{d\rho}, \quad (3)$$

где v — удельный объем. Тепловые члены уравнений записываются следующим образом:

$$E_T = \int_0^T c_v dT, \quad (4)$$

$$p_T = \frac{R}{m} \varphi(\rho) \rho T, \quad (5)$$

где c_v — удельная теплоемкость, $\varphi(\rho)$ — функция, определенная экспериментально, R — газовая постоянная, m — средняя молекулярная масса.

При $c_v = \text{const}$ (политропический газ) из уравнения (4) получаем

$$E_T = c_v T. \quad (6)$$

Подставляя уравнения (1), (2) в (5), (6) и полагая температуру постоянной, запишем уравнение состояния Ми — Грюнайзена в форме

$$p = p(\rho, E) = p_x(\rho) + \rho \Gamma(\rho) [E - E_x(\rho)], \quad (7)$$

где $\Gamma(\rho) = \omega = R\varphi(\rho)/(mc_v)$ — коэффициент Грюнайзена [3, 30].

Обычно для продуктов детонации конденсированных ВВ используются уравнения состояния в виде (7). Однако в (7) по-разному определяется вид функций $\Gamma(\rho)$ и $p_x(\rho)$. Кроме того, различаются методы определения коэффициентов уравнения состояния

$$\left(\frac{\partial p}{\partial E} \right)_\rho = \rho \Gamma(\rho). \quad (8)$$

Интегрируя уравнение (8) при постоянной плотности, получаем

$$\int_{p_0}^p dp = \rho \Gamma(\rho) \int_{E_0}^E dp. \quad (9)$$

Для изоэнтروпического процесса

$$p = p_s(\rho) + \omega \frac{\rho}{\rho_e} [\bar{E} - \bar{E}_s(\rho)],$$

где $\bar{E} = E/v_e = \rho_e E$ — внутренняя энергия продуктов детонации, отнесенная к единице объема ВВ, $\bar{E}_s(\rho) = E_s/v_e = \rho_e E_s$ — то же самое при изоэнтропическом процессе, ρ_e — плотность ВВ, v_e — удельный объем ВВ.

Предполагалось, что коэффициент Грюнайзена $\Gamma(\rho)$ остается постоянным во всем диапазоне давления. Положив $\omega(\rho) = \text{const}$, приходим к уравнению состояния конденсированных ВВ и затем, принимая в расчет закон энтропии ВВ, получаем уравнение Джонса — Уилкинса — Ли (JWL)

$$p = A \exp(-R_1 V) + B \exp(-R_2 V) + C V^{-(1+\omega)}, \quad (10)$$

где $V = v/v_e$; A, B, R_1, R_2, ω — коэффициенты, определенные опытным путем. Учитывая выражение

$$d\bar{E}_s = -p_s dV \quad (11)$$

и уравнение (10), запишем уравнение состояния JWL в форме, которая может быть использована в программе LS-DYNA:

$$p = p(V, E) = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V}\right) \exp(-R_1 V) + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V}\right) \exp(-R_2 V) + \frac{\omega \bar{E}}{V}. \quad (12)$$

Один из методов определения коэффициентов A, B, R_1, R_2 и ω — цилиндр-тест [30].

Уравнения (10) и (12) с хорошей точностью соответствуют экспериментальным данным при $V \leq 7$. При разгрузке продуктов детонации до значений $V > 7$ необходимо внести поправки в уравнение состояния JWL или использовать другое уравнение состояния.

Для описания металла использовано эмпирическое уравнение Джонсона — Кука в виде

$$\sigma_y = (A + B \bar{\varepsilon}^n)(1 + C \ln \bar{\varepsilon}^*)(1 - T^{*m}), \quad (13)$$

где A, B, C, n, m — константы линейного полиномиального уравнения, $T^* = (T - T_r)/(T_m -$

$T_r)$, T — температура металла, T_m — температура плавления, T_r — температура окружающей среды, $\bar{\varepsilon}^*$ — либо эффективная полная скорость деформации, либо эффективная скорость пластической деформации, $\bar{\varepsilon}$ — эффективная пластическая деформация, σ_y — напряжение пластического течения.

Среда, окружающая кумулятивный заряд и мишень, как правило, воздух. Ее можно описывать уравнением состояния из [29]. Чтобы улучшить соответствие значений, реальных и полученных при моделировании, использовано уравнение в виде линейного полинома:

$$p = C_0 + C_1 \mu + C_2 \mu^2 + C_3 \mu^3 + (C_4 + C_5 \mu + C_6 \mu^2) E, \quad (14)$$

где $\mu = 1/V_{rel} - 1$ — объемный параметр, $C_0, C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6$ — константы линейного полиномиального уравнения, V_{rel} — относительный объем.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Подготовка сетки конечных элементов — важная стадия моделирования. Процедура дискретизации заключается в делении структуры на элементы конечного размера. Взаимодействие между элементами определяется в узлах элементов, а для описания соотношения между узлами этого элемента используется «функция формы», задача которой описывать физические свойства этого элемента. Выбор количества узлов и «функции формы» проводится таким образом, чтобы наиболее точно описать моделируемое явление. Структура сетки — это компромисс между ожидаемой точностью и стоимостью анализа, и она должна строиться так, чтобы максимально точно представить реальный объект. Правильность дискретизации модели напрямую влияет на точность и скорость вычислений. Дефекты сетки могут отразиться на результатах расчетов, а иногда сделать их невозможными. Поэтому сетка была обработана с целью исключить дефекты.

Знание моделируемого явления позволяет сделать сетку более плотной в области, представляющей наибольший интерес, и менее плотной в других. В результате точность вычислений заметно возрастает при небольшом увеличении требований к производительности компьютера. Корректный выбор центра

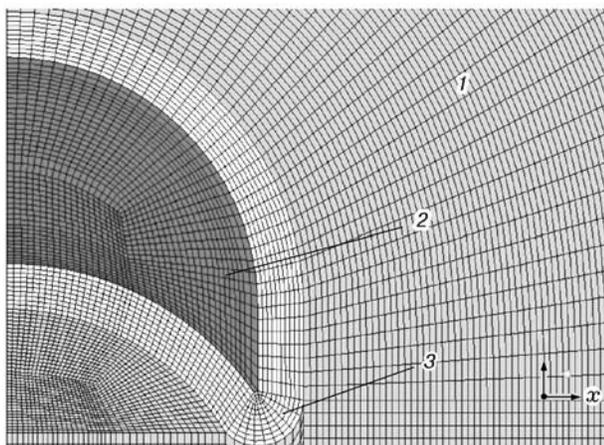


Рис. 2. Вид сетки для моделирования кумулятивного заряда:

1 — воздух, 2 — ВВ, 3 — лайнер и оболочка

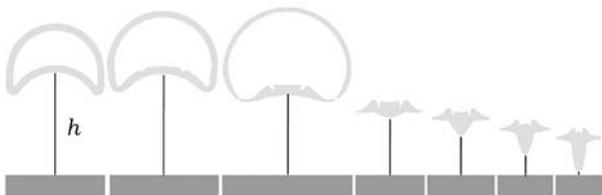


Рис. 3. Процесс формирования струи линейного кумулятивного заряда (шаг 3.6 мкс)

Таблица 4
Динамика формирования струи кумулятивного заряда (шаг 3.6 мкс)

t , мкс	h , мм
0.00	26.00
3.60	24.21
7.20	19.27
10.80	13.72
14.40	8.34
18.00	3.42

геометрии схемы дает возможность построить правильную гексагональную сетку (рис. 2).

Моделирование процесса образования кумулятивной струи позволяет оптимизировать расстояние до мишени. При этом учитываются не только угол раствора лайнера, но и используемые материалы, а также условия окружающей среды. Процесс образования струи для тестируемых зарядов показан на рис. 3 и в табл. 4.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Испытательный стенд состоял из кумулятивного заряда и стальной мишени. Заряд размещался над мишенью на прокладках так, что вершина лайнера отстояла на 20 мм от мишени. Сама мишень находилась на некотором расстоянии от земли, чтобы исключить влияние волны, отраженной от нее, на результат воздействия струи.

Результаты натурных испытаний (рис. 4) (средняя толщина обеих пластин, разрезанных струей, — 12.2 мм, разбитой пластины — 7.8 мм) хорошо согласуются с модельным расчетом — отличие составляет 3% (рис. 5). Необходимо отметить, что в модельном расчете отсутствовали разрушенные края вследствие



Рис. 4. Результат действия струи



Рис. 5. Соударение струи с преградой в момент времени 71.95 мкс (расчет)

граничных условий, наложенных на плоскость симметрии. Узловые точки на этой поверхности имели все степени свободы, кроме движения вдоль плоскости симметрии. Такая процедура необходима для того, чтобы геометрическая плоскость симметрии была также плоскостью симметрии характеристик материала и условий нагружения. Масса меди, оставшейся после взрыва, составляла 38.58 г и отличалась на 5.24 % от результата расчета. Следует отметить, что при двумерном моделировании не рассматриваются детонация ВВ, формирование струи и процесс резки на краях линейного кумулятивного заряда.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для построения модели формирования струи в линейном кумулятивном заряде методом конечных элементов использован программный пакет LS-DYNA. Выбраны необходимые параметры для уравнений, описывающих материалы кумулятивного заряда. Оптимизировано расстояние от заряда до мишени. Рассмотренная модель проверена экспериментально, результаты опыта хорошо совпадают с расчетом, поэтому она может быть использована для проектирования других линейных кумулятивных зарядов.

Работа частично поддержана SWIFT (Scholarships Supporting Innovative Forum of Technology) в рамках проекта РОКЛ.08.02.01-24-005/10, который финансируется также Европейским союзом в рамках Европейского социального фонда (стипендиат SWIFT — Т. Витковски).

ЛИТЕРАТУРА

1. Walters W. P., Zukas J. A. Fundamentals of shaped charges. — N.Y.: Wiley-Interscience, 1989.
2. Лобанов В. Ф., Фадеев Ю. И. Кумуляция продуктов детонации полого цилиндрического заряда // Физика горения и взрыва. — 1974. — Т. 10, № 1. — С. 119–124.
3. Физика взрыва / под ред. Л. П. Орленко. — М.: Наука, 2004.
4. Селиванов В. В., Кобылкин И. Ф., Новиков С. А. Взрывные технологии. — М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008.
5. Meyer R., Köhler J., Homburg A. Explosives. — Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2007.
6. Held M. B. Requirements for high explosive charges for shaped charges // Proc. of the 2003 Intern. Autumn Seminar on Propellants Explosives and Pyrotechnics (2003 IASPEP) — Theory and Practice of Energetic Materials, 15–18 October 2003, Guilin, China.
7. Baker E. L., DeFisher S., Daniels A., Vuong T., Pham J. Glass as a shaped charge liner material // 26th Intern. Symp. on Ballistics, 12–16 September 2011, Miami, United States.
8. Пипич П. В. Экспериментальное исследование высокоскоростных кумулятивных струй // ПМТФ. — 2000. — Т. 41, № 5. — С. 62–67.
9. Wanming J., Quanxiao Z., Zhiguo B., Shao-hua M., Dong Y., Yingqi W. Progress on manufacturing techniques of shaped charge liners // Rare Metal Mater. and Eng. — 2007. — V. 36, N 9. — P. 1511–1516.
10. Katayama M., Takeba A., Toda S., Kibe S. Analysis of jet formation and penetration by conical shaped charge with the inhibitor // Intern. J. Impact Eng. — 1999. — V. 23, N 1. — P. 443–454.
11. Baker E. L., Daniels A., Voorhis G. P., Vuong T., Pearson J. Development of molybdenum shaped charge liners // 127th Annu. Meeting and Exhibition, 16–19 February 1998, San Antonio, United States.
12. Уолтерс У., Гуч У., Беркинс М. Сопротивление титанового сплава прониканию кумулятивных струй, сформированных зарядом с танталовой облицовкой // Физика горения и взрыва. — 2000. — Т. 36, № 6. — С. 77–82.
13. Tie-Fu W., He-Rong Z. Copper-tungsten shaped charge liner and its jet // Propell., Explos., Pyrotech. — 1996. — V. 21, N 4. — P. 193–195.
14. Zygmunt B., Wilk Z. Formation of jets by shaped charges with metal powder liners // Propell., Explos., Pyrotech. — 2008. — V. 33, N 6. — P. 482–487.
15. Лаврентьев М. Кумулятивный заряд и принципы его работы // Успехи мат. наук. — 1957. — Т. 12, № 4. — С. 41–56.
16. Birkhoff G., MacDougall D. P., Pugh E. M., Taylor G. Explosives with lined cavities // J. Appl. Phys. — 1948. — V. 19, N 6. — P. 563–582.
17. Włodarczyk E. Analiza parametrów strumienia i zbitki w procesie kumulacji. Część I. Stacjonarna hydrodynamiczna teoria kumulacji // Biuletyn Wojskowej Akademii Technicznej. — 1992. — V. 41, N 484. — P. 13–42.
18. Cudziło S., Maranda A., Nowaczewski J., Trębiński R., Trzciński W. A. Wojskowe materiały wybuchowe. — Częstochowa, 2000.
19. Чжан С., Цяо Л. Формирование и внедрение струи, генерируемой двухслойным кумулятивным зарядом // Физика горения и взрыва. — 2011. — Т. 47, № 2. — С. 128–136.
20. Petushkov V. G., Volgin L. A., Dobrushin L. D. Explosion cutting and its application // Paton Welding J. — 2003. — N 7. — P. 25–32.

21. **Кинеловский С. А., Тришин Ю. А.** Физические аспекты кумуляции // Физика горения и взрыва. — 1980. — Т. 16, № 5. — С. 26–40.
22. **Zaid A. I., Hawkyard J. B., Johnson W.** Experiments in plate cutting by shaped high explosive charges // J. Mech. Eng. Sci. — 1971. — V. 13, N 1. — P. 13–25.
23. **Лаптев В. И., Рубцов М. В., Тришин Ю. А.** Об использовании модели вязкой жидкости для описания высокоскоростных струйных течений металлов // Физика горения и взрыва. — 1984. — Т. 20, № 1. — С. 80–86.
24. **Trishin Y. A.** Some physical problems of cumulation // J. Appl. Mech. Tech. Phys. — 2000. — V. 41, N 5. — P. 773–787.
25. **Шехтер Б. И., Шушко Л. А., Крыськов С. Л.** Исследование процесса обжатия облицовки удлиненного кумулятивного заряда и формирования элементов кумулятивного ножа // Физика горения и взрыва. — 1977. — Т. 13, № 2. — С. 244–254.
26. **Nowak H.** Wnikanie strumienia kumulacyjnego w jednolitą przeszkodę // Biuletyn Wojskowej Akademii Technicznej. — 1969. — V. 18, N 197. — P.110–120.
27. **Nowak H.** Wnikanie strumienia kumulacyjnego w masywną przeszkodę składającą się z kilku warstw różnych materiałów // Biuletyn Wojskowej Akademii Technicznej. — 1970. — V. 19, N 209. — P. 59–68.
28. **Проскуряков Е. В., Сорокин М. И., Фомин В. М.** Взаимодействие кумулятивной струи с преградой, имеющей осевое отверстие // ПМТФ. — 2008. — V. 49, № 6. — С. 13–16.
29. **LS-DYNA** Keyword Use's Manual. Version 970. — Livermore Software Technology Corporation, April 2003.
30. **Włodarczyk E.** Podstawy fizyki wybuchu. — Warszawa: Wojskowa Akademia Techniczna, 2012.

*Поступила в редакцию 18/VII 2012 г.,
в окончательном варианте — 27/VI 2013 г.*
