

УДК 539.3

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ УДАРНО-ВОЛНОВОГО НАГРУЖЕНИЯ ОПТИЧЕСКИ ПРОЗРАЧНЫХ ОБЪЕКТОВ

© Сергей Иванович Герасимов^{1,2}, Владимир Иванович Ерофеев¹,
Василий Андреевич Кикеев¹, Вадим Анатольевич Кузьмин²

¹Институт проблем машиностроения РАН, Нижний Новгород, Россия

²Российский федеральный ядерный центр – ВНИИЭФ, Саров, Россия

erof.vi@yandex.ru

Аннотация. Представлены результаты расчетно-экспериментального исследования взрывного нагружения плиты из оргстекла. По результатам фоторегистрации подобраны упругие характеристики материала.

Ключевые слова: ударно-волновое нагружение, оргстекло, фоторегистрация, численное моделирование.

THE CALCULATED-EXPERIMENTAL STUDY OF SHOCK-WAVE LOADING OF OPTICALLY TRANSPARENT OBJECTS

© S.I. Gerasimov^{1,2}, V.I. Erofeev¹, V.A. Kikeev¹, V.A. Kuzmin²

¹Mechanical Engineering Research Institute, Russian Academy of Sciences,
Nizhny Novgorod, Russia

²Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute of Experimental Physics,
Sarov, Russia

erof.vi@yandex.ru

Abstract. Presents the results of the calculations and experimental research of explosive loading plate of plexiglas. According to the results of photographic recording selected elastic characteristics of the material.

Key words: shock-wave loading, plexiglas, photographic recording, numerical simulation.

Введение.

Изучение реакции твердых тел на ударно-волновое нагружение является важной задачей технической диагностики. Определение характера и времени распространения волновых возмущений позволяет дать заключение о физико-механических свойствах нагружаемого объекта, подобрать константы и провести верификацию математической модели. Для этих целей применяются различные экспериментальные методы: метод Кольского и его модификации [1-5], методы с использованием манганиновых датчиков [6], а также методы визуализации быстропротекающих процессов [7-9].

Для визуализации ударно-волновых процессов в оптически прозрачных объектах применяются методы, основанные на зависимости показателя преломления прозрачных сред от локальной плотности среды – теневые методы.

В настоящей работе приведены результаты экспериментального исследования развития волнового возмущения в плите из оргстекла и результаты численного моделирования этого процесса. Экспериментальные данные получены путем применения прямотеневой фоторегистрации на низкочувствительную пленку с использованием взрывного источника света с отсечкой излучения за счет перемешивания [9]. Численное моделирование осуществлялось на регулярной трехмерной сетке с использованием явного решателя в связанной лагранжево-эйлеровой постановке.

1. Постановка эксперимента

Объектом исследования является плита из оргстекла с размерами 55x55x10 мм. Нагружение осуществлялось взрывом электродетонатора, который располагался снизу, контактируя с центром нижней грани. Принципиальная схема [9] размещения экспериментального оборудования и образца показаны на рис. 1.

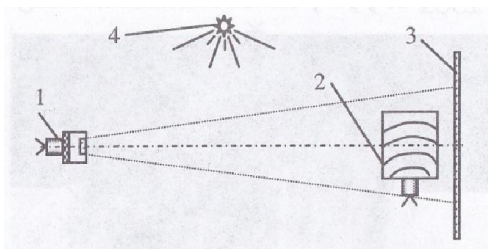


Рис. 1. Принципиальная схема размещения экспериментального оборудования: 1 – миниатюрный взрывной источник света, 2 – объект исследования, 3 – низкочувствительная фотопленка, 4 – искусственное освещение.

На основе полученных в различные моменты времени фотографий можно сделать вывод о скорости, характере распространения возмущения по образцу, и подобрать физико-механические свойства математической модели.

2. Численное моделирование

Численный расчет ударно-волнового нагружения проводился в конечно-элементном программном комплексе ANSYS с использованием явного решателя LS-DYNA [10-12,14]. Решение осуществлялось произвольным лагранжево-эйлеровым методом (Arbitrary Lagrangian-Eulerian Formulation) [12] на регулярной трехмерной сетке. Использовались трехмерные восьмиузловые элементы Solid 164 с заданием формулировки Лагранжа для описания плиты из оргстекла, и формулировки Эйлера – для описания тех частей, которые ведут себя как жидкость-воздух и взрывчатое вещество (ВВ).

Размер ячейки расчетной области, занимаемой оргстеклом, составляет 0,76 мм. Количество ячеек, описывающих объем оргстекла, составляет 72576. Общее количество ячеек, принятое для описания данной задачи, составляет 268654.

Система уравнений, описывающих течение среды [13], имеет вид

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \rho (\mathbf{v} - \mathbf{u}) + \rho \operatorname{div} \mathbf{v} = 0 \\ \rho \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \rho \nabla \mathbf{v} (\mathbf{v} - \mathbf{u}) = \mathbf{F} + \operatorname{div} \sigma \\ \rho \frac{\partial E}{\partial t} + \rho \nabla E (\mathbf{v} - \mathbf{u}) = \sigma \cdot \dot{\varepsilon} \end{cases}$$

где ρ – плотность среды, \mathbf{v} – вектор скорости среды, \mathbf{u} – вектор скорости узлов сетки, \mathbf{F} – векторное поле массовых сил, σ – тензор напряжений, $\dot{\varepsilon}$ – тензор скоростей деформаций, E – внутренняя энергия, t – текущее время.

Напряженно-деформированное состояние в точке расчетной области определялось общей системой уравнений:

$$\begin{aligned} \sigma_{ij} &= -p \cdot \delta_{ij} + s_{ij} \\ p &= p(\rho, E), \end{aligned}$$

где σ_{ij} – тензор напряжений, s_{ij} – девиатор напряжений, δ_{ij} – символ Кронекера, p – гидростатическое давление, заданное уравнением состояния.

Каждая часть расчетной модели ставится в соответствие своя математическая модель материала, позволяющая адекватно описать заданное воздействие.

Плита из оргстекла описывалась упругой моделью материала в соответствии с системой уравнений

$$\begin{aligned} s_{ij} &= 2G e_{ij}, \\ p &= -K\theta \end{aligned}$$

где G – модуль сдвига материала, s_{ij} – девиатор напряжений, p – гидростатическое давление, e_{ij} – девиатор деформаций, θ – объемная деформация.

Воздух в расчете подразумевался идеальной средой без учета вязкостных свойств. Напряженно-деформированное состояние определяется только гидростатическим давлением

$p = (\kappa - 1) \frac{\rho}{\rho_0} E$, где $\kappa = 1,4$ – показатель адиабаты, E – внутренняя энергия на единицу объема, ρ_0 – начальная плотность.

Для задания материала ВВ использовалась специальная модель взрывчатого вещества, позволяющая моделировать детонацию и течение продуктов взрыва [7, 9]. Давление в элементе ВВ в каждый момент времени определяется по формуле

$$p = F \cdot p(\rho, E),$$

где $F = \max(F_1, F_2)$ – доля выгорания взрывчатого вещества, $F_1 = \frac{\rho \cdot D^2}{P_{CJ}} \left(1 - \frac{V}{V_0}\right)$, $F_2 = \frac{2D(t - t_b)}{3\Delta x}$, ρ – плотность ВВ, D – скорость детонации, P_{CJ} – давление Чепмена-Жуге, t_b – время выгорания элемента, Δx – характерный размер элемента.

Уравнение состояния для продуктов детонации ВВ принято в форме Джонса-Уилкинса-Ли [7,9,15]:

$$p(\rho, E) = A \cdot \left(1 - \frac{\omega}{R_1 \cdot V}\right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_1 \cdot V}\right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega \cdot E}{V}, \quad (1)$$

где $V = \frac{\rho_0}{\rho}$ – относительный объем продуктов детонации ВВ в процессе взрыва, A, B, R_1, R_2, ω – эмпирические константы, E – внутренняя энергия в единице объема.

Уравнению (1) соответствует изоэнтропа продуктов взрыва:

$$p_s = A \cdot e^{-R_1 V} + B e^{-R_2 V} + C \cdot V^{-(1+\omega)} \quad (2)$$

Упругие свойства оргстекла и плотность приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Физико-механические свойства оргстекла

Плотность, кг/м ³	Модуль упругости E , МПа	Коэффициент Пуассона ν
1180	7000	0,3

Плотность оргстекла принята в соответствии с [16]. Модуль упругости и коэффициент Пуассона подобраны таким образом, чтобы волновая картина численного расчета совпадала с экспериментом.

Плотность воздуха составляла $\rho_0 = 1,225 \text{ кг/м}^3$.

2. Параметры модели материала ВВ, принятые в соответствии с [17] приведены в таблице

Таблица 2 - Параметры модели материала ВВ

Плотность ВВ $\rho, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	Скорость детонации $D, \text{ км/с}$	Давление Чепмена-Жуге $P_{CJ}, \text{ ГПа}$
1717	7,98	29,5

3. Параметры уравнения состояния ВВ взяты в соответствии с [17], и приведены в таблице

Таблица 3 - Параметры уравнения состояния продуктов детонации ВВ

$A, \text{ ГПа}$	$B, \text{ ГПа}$	R_1	R_2	ω
524,2	7,678	4,2	1,1	0,34

3. Результаты численного моделирования и эксперимента. Сравнение.

На рис. 2-5 представлены картины распространения ударно-волнового возмущения по плите из оргстекла. На теневой фотографии это выражено в регистрации оптических неоднородностей при выходе возмущений на свободную поверхность и зоны потери прозрачности в объеме оргстекла. Рядом с теневыми фотографиями приведены результаты численного расчета в виде полей скорости и давления.

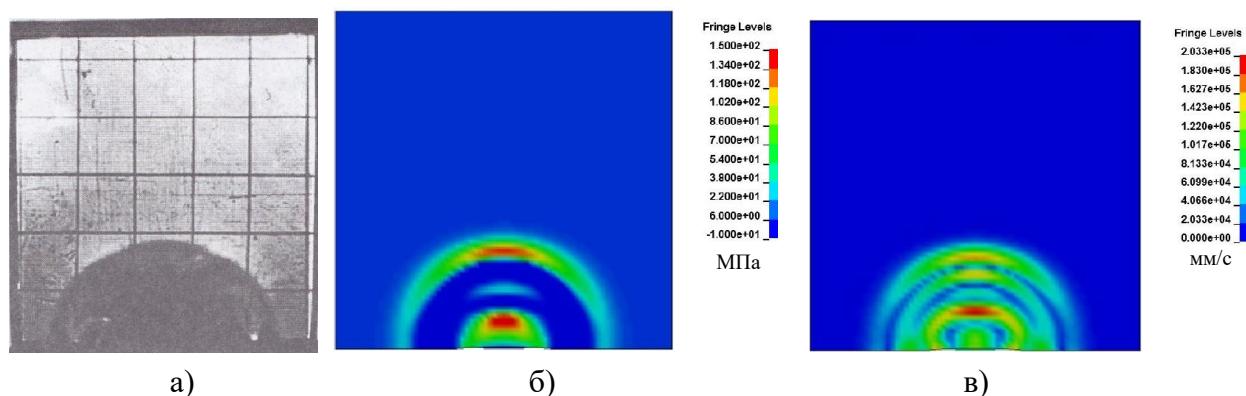


Рис. 2. Картина распространения ударно-волнового возмущения: *а* – теневая картина процесса (эксперимент; 6,1 мкс), *б* – распределение давления (расчет; 6,3 мкс), *в* – распределение результирующей скорости (расчет; 6,3 мкс).

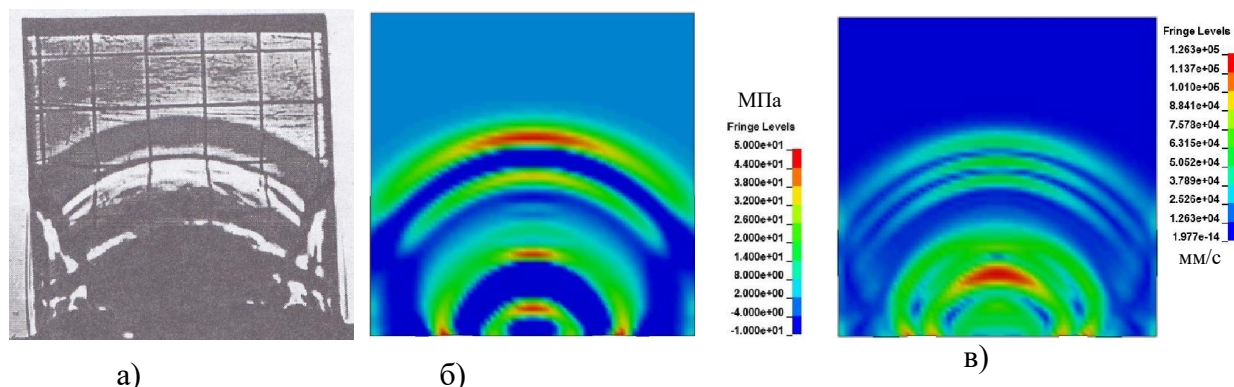


Рис. 3. Картина распространения ударно-волнового возмущения: *a* – теньевая картина процесса (эксперимент; 12 мкс), *б* – распределение давления (расчет; 12,2 мкс), *в* – распределение результирующей скорости (расчет; 12,2мкс).

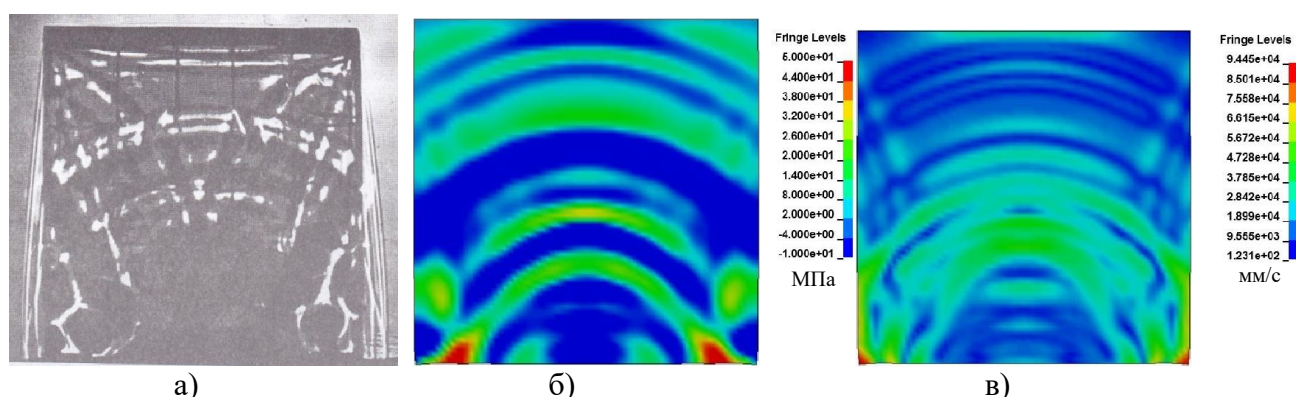


Рис. 4. Картина распространения ударно-волнового возмущения: *a* – теньевая картина процесса (эксперимент; 20 мкс), *б* – распределение давления (расчет; 20,2 мкс), *в* – распределение результирующей скорости (расчет; 20,2мкс).

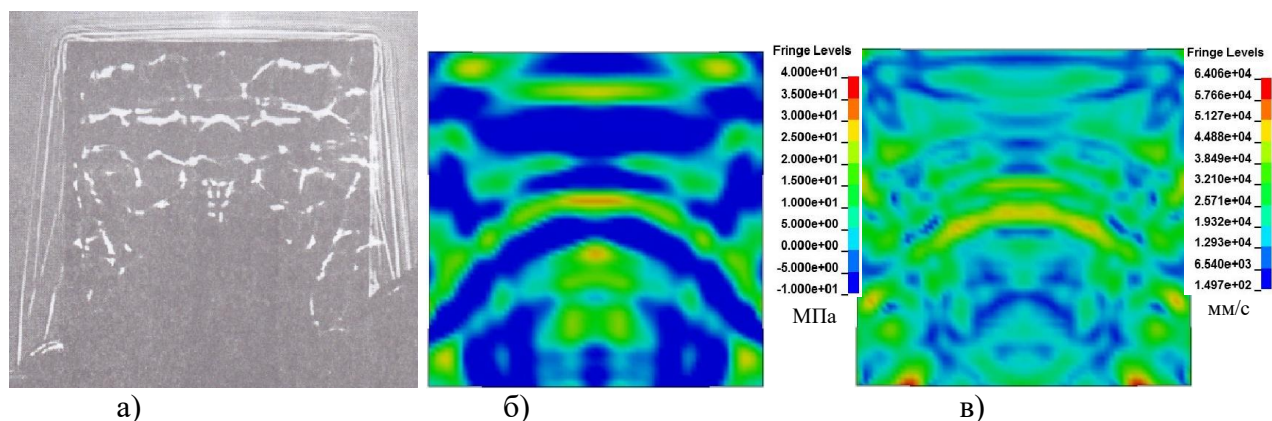


Рис. 5. Картина распространения ударно-волнового возмущения: *a* – теньевая картина процесса (эксперимент; 30 мкс), *б* – распределение давления (расчет; 30,68 мкс), *в* – распределение результирующей скорости (расчет; 30,68).

Как видно из рис. 2-5, максимальная погрешность временной реализации волновой картины в расчете по сравнению с экспериментом составляет не больше 3,2 %.

Об осцилляции свободной поверхности можно судить по графику изменения скорости точки, расположенной на свободной поверхности плиты. Точки, в которых определялась скорость, показаны на рис. 6.

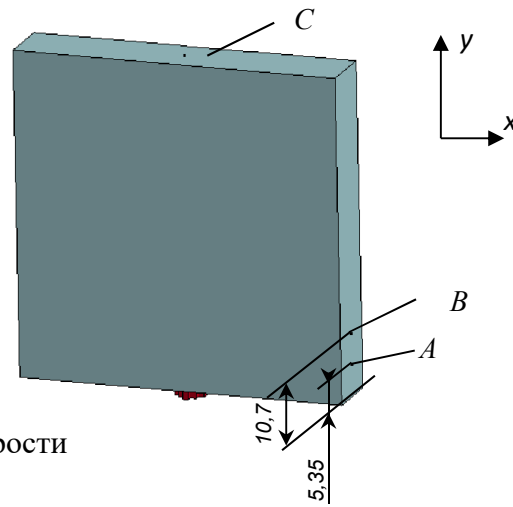


Рис.6. Точки определения скорости

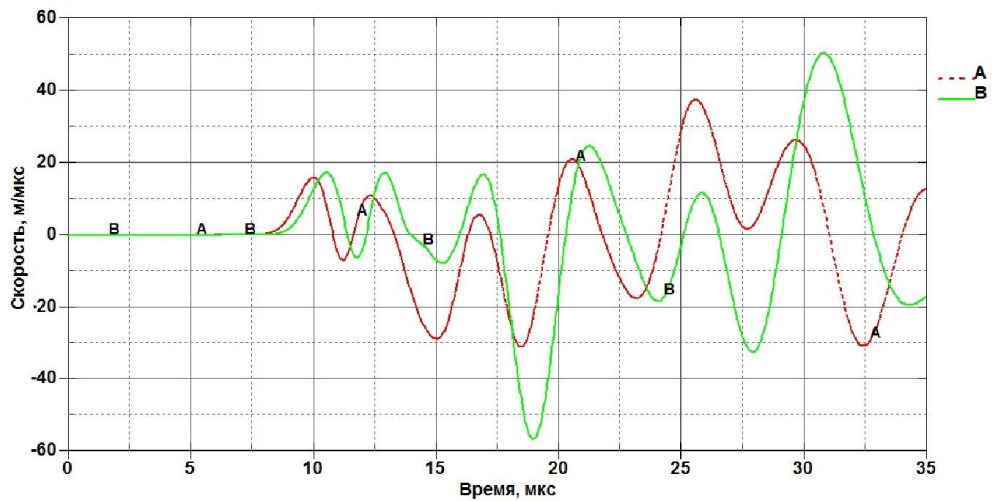


Рис.7. Скорости точек А и В в направлении оси x .

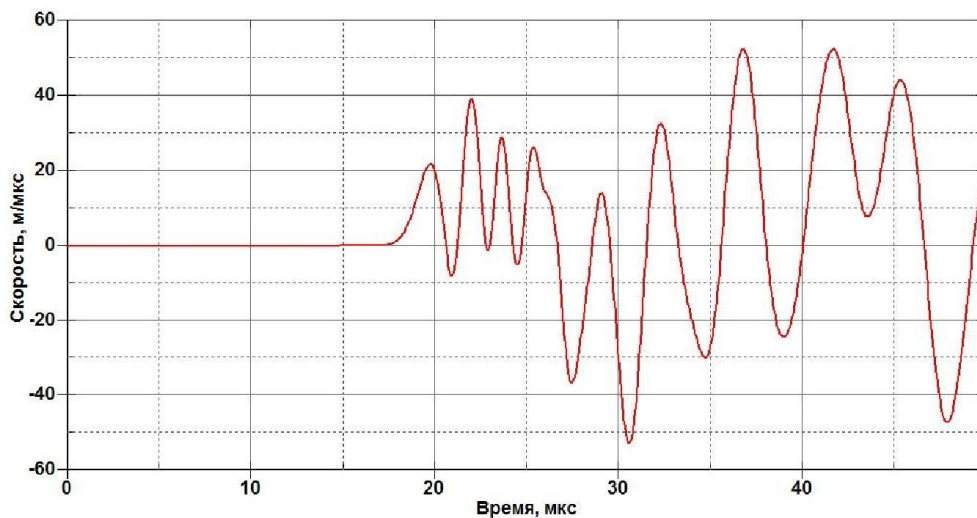


Рис. 8. Скорости точки С в направлении оси y .

По графикам изменения скоростей точек можно сделать вывод, что на момент времени $t=30$ мкс боковая поверхность (где расположены точки А и В) совершила 6 осцилляций, верхняя (где расположена точка С) – 5 осцилляций. Это соответствует теневой картине.

Заключение

В работе приведены теневые фотографии ударно-волнового нагружения оргстекла. Представлены результаты численного моделирования в связанной лагранжево-эйлеровой постановке, в котором оргстекло описывалось упругой моделью материала. Упругие константы модели подобраны итерационно из соответствия волновых картин в различные моменты времени экспериментальным данным. Получено хорошее соответствие предложенной модели экспериментальным данным.

Работа выполнялась при поддержке Российского научного фонда (грант № 14-19-01637).

Список литературы

1. Кольский Г. Волны напряжения в твердых телах. М.: Иностранная литература. 1955. 190 с.
2. Nicholas T. Tensile testing of materials at high rates of strain // Exp. Mech. 1981. Vol. 21. No 5. P.177-185.
3. Bragov A.M., Lomunov A.K. Methodological aspects of studying dynamic material properties using the Kolsky method // Int. J. of Impact Engineering. 1995. Vol. 16. No 2. P.321-330.
4. Chen W., Ravichandran G. Dynamic compressive failure of glass ceramic under lateral confinement // J. Mech. Phys. Solids. 1997. Vol.45. P.1303-1328.
5. Брагов А.М., Игумнов Л.А., Ломунов А.К. Высокоскоростная деформация мелкозернистого бетона и фибробетона. Нижний Новгород: Изд-во ННГУ. 2015. 270 с.
6. Машиностроение. Энциклопедия в сорока томах. Т.1-3, кн. 2. М.: Машиностроение. 1995. 622 с.
7. Физика быстропротекающих процессов. Сборник статей в 3-х томах / Пер. с английского. Под ред. Н.А. Златина. М.: Мир, 1971. Т.1, 520 с.; Т. 2, 352 с.; Т. 3, 358 с.
8. Шкуратник В.Л., Вознесенский А.С., Колодина И.В. Методы и средства изучения быстропротекающих процессов. М.: Горная книга, 2004. 310 с.
9. Герасимов С.И., Файков Ю.И. Теневое фотографирование в расходящемся пучке света. Саров: Изд-во РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2010. 344 с.
10. Hallquist J.O. LS-DYNA: Theoretical manual. Livermore Software Technology Corporation, Livermore, 1998. 498 p.
11. Ansys, customer number 602402.
12. Souli M. "LS-Dyna Advanced Course in ALE and Fluid/Structural Coupling". Course Note for Arbitrary Lagrangian-Eulerian Formulation Technique / M Souli. Livermore, LSTC, CA, 2000.
13. Белоцерковский О.М., Давыдов Ю.М. Метод крупных частиц в газовой динамике. М.: Наука. 1982. 392 с.

14. Муйземнек А.Ю., Богач А.А. Математическое моделирование процессов удара и взрыва в программе LS-DYNA. Пенза: Информационно-издательский центр ПГУ. 2005. 106 с.
15. Lee E, Finger M., Collins W. JWL equation of state coefficients for high explosives. Rept-UCID-16189, Lawrence Livermore National Laboratory, 1973.
16. ГОСТ 17622-72. Стекло органическое техническое. Технические условия.
17. Физика взрыва / Под ред. Л.П. Орленко. - Изд. 3-е, испр. - В 2 т. Т.1. М.: Физматлит. 2004. 832 с.

Дата поступления статьи: 15 июля 2016 года.