

УДК 532.592.2

## РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗРЫВНОГО НАГРУЖЕНИЯ ТОНКОСТЕННОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ

© Сергей Иванович Герасимов, Вадим Анатольевич Кузьмин,  
Василий Андреевич Кикеев, Николай Александрович Трепалов,  
Владимир Сергеевич Роженцов

*Институт проблем машиностроения РАН, Нижний Новгород*  
[s.i.gerasimov@mail.ru](mailto:s.i.gerasimov@mail.ru), [v\\_a\\_kuzmin@mail.ru](mailto:v_a_kuzmin@mail.ru), [vkikeev@mail.ru](mailto:vkikeev@mail.ru)

*Аннотация.* Представлены результаты расчетного и экспериментального исследования процесса взрывного нагружения тонкостенной оболочки двумя методами: теоретическим – на основе численного моделирования на регулярной трехмерной сетке с использованием явного решателя в связанной лагранжево-эйлеровой постановке, экспериментальным – с использованием высокоскоростной видеорегистрации наружной поверхности оболочки.

*Ключевые слова:* взрывное нагружение, метод численного решения, высокоскоростная видеорегистрация.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (Грант № 18-38-00297).*

## DESIGN AND EXPERIMENTAL STUDY OF EXPLOSIVE LOADING OF A THIN-WALL CYLINDRICAL SHELL

© S.I. Gerasimov, V.A. Kuzmin, V.A. Kikeev, N.A. Trepalov, V.S. Rozhentsov  
*Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Science,  
Nizhny Novgorod, Russia*

[s.i.gerasimov@mail.ru](mailto:s.i.gerasimov@mail.ru), [v\\_a\\_kuzmin@mail.ru](mailto:v_a_kuzmin@mail.ru), [vkikeev@mail.ru](mailto:vkikeev@mail.ru)

*Abstract.* The results of a calculation and experimental study of the explosive loading of a thin-walled shell by two methods are presented: theoretical - based on numerical modeling on a regular three-dimensional grid using an explicit solver in a connected Lagrangian-Euler formulation, experimental - using high-speed video recording of the outer shell surface.

*Keywords:* explosive loading, numerical solution method, high-speed video recording.

*Acknowledgements.* The work was supported by the RFBR, project no. 18-38-00297.

**Введение.** Изучение реакции оболочечной тонкостенной конструкции на взрывное локальное воздействие является важной и сложной задачей. Исследование волновых процессов, определение характера деформирования и разрушения, времени распространения волновых возмущений позволяет дать заключение о физико-механических свойствах нагружаемого объекта, подобрать константы и провести верификацию математической

модели. В конечном счете, это дает возможность провести оценки рисков возникновения аварийных ситуаций на элементах трубопроводного транспорта.

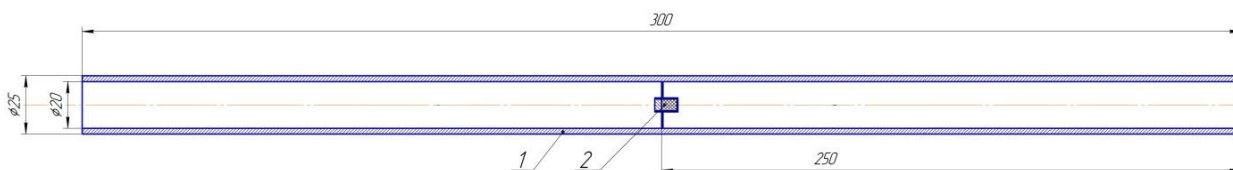
Наилучший результат при решении подобных проблем дает комплексный расчетно-экспериментальный подход.

Одним из экспериментальных методов исследования быстропротекающих процессов является скоростная видеорегистрация. Вместе с тем необходимо отметить неизменно возрастающую роль численного моделирования, средств компьютерной обработки и представления результатов в изучении быстропротекающих процессов. И сейчас чаще всего именно комплексное использование экспериментальных методов и средств получения необходимой информации о том или ином физическом процессе и численного моделирования с широкими возможностями представления полученных результатов расширяет инструментарий исследователя.

Численное моделирование осуществлялось на трехмерной сетке с использованием явного решателя в связанной лагранжево-эйлеровой постановке. Приведено сравнение деформированной формы оболочки, полученной экспериментально и в численном расчете.

Для представления результатов численного расчета и визуализации используются средства и возможности графического интерфейса [1].

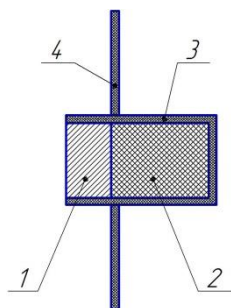
**Постановка эксперимента.** Объектом исследования является тонкостенная цилиндрическая оболочка - труба из алюминиевого сплава АМг5 наружным диаметром 25 мм и толщиной стенки 2,5 мм. Схема экспериментальной сборки показана на рисунке 1.



**Рис. 1.** Схема экспериментальной сборки: 1 – труба (сплав АМг5); 2 – заряд.

В качестве заряда была применена сборка из светочувствительного взрывчатого состава ВС-2 и ТЭНа, находящегося в составе детонирующего шнура ДШЭ-12 (ГОСТ 6196-78). ВС-2 размещался в латунном колпачке диаметром 5 мм и высотой 3 мм. Основой светочувствительного взрывчатого состава ВС-2 является комплексный перхлорат ртути (II) с 1-Н-5-гидразинотеразолом в качестве лиганда [2]. При приготовлении энергонасыщенного светочувствительного состава ВС-2 в качестве инертной матрицы (связующего) используется оптически прозрачный полимер – сополимер 2-метил-5-винилтетразола (~ 98%) и метакриловой кислоты (~ 2%). Готовый состав содержит 10% полимера и 90% комплексного перхлората ртути (II). Перхлоратный комплекс ртути представляет собой белое кристаллическое вещество с плотностью монокристалла  $3,45 \text{ г/см}^3$  [3]. Колпачок с ВС-2 и отрезок детонирующего шнура ДШЭ-12 (длина 12 мм, масса ВВ ~ 0,4 г) устанавливались в картуз. Картуз цилиндрической формы расположенный в центровочном диске (см. рисунок 2). Центровочный диск и картуз выполнены из бумаги офисной С+, 80 ГОСТ Р 58106-2018. Заряд располагался в центре алюминиевой трубы, как показано на рисунке 1.

Заряд инициировался оптическим способом с использованием лазерного диода в режиме моноимпульса [4]. Использовался лазерный диод ТО-56 с длиной волны 445 нм и электрической мощностью 9 Вт. Лазерный диод подключался к источнику питания через управляемый электронный ключ со стабилизацией тока [5].

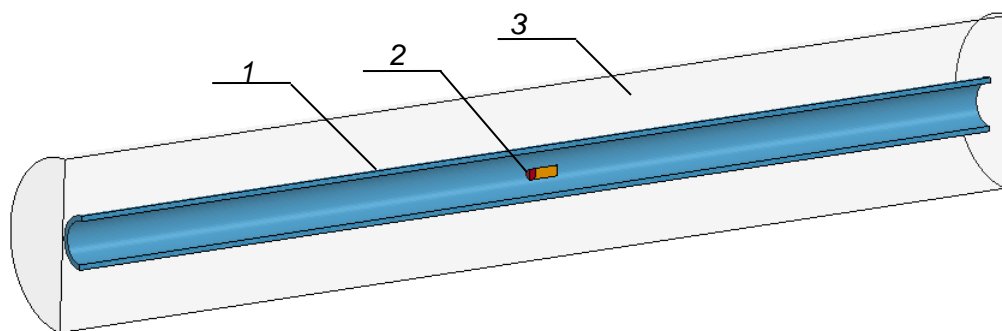


- 1 – колпачок с составом ВС-2 (масса состава ~ 45 мг);  
 2 – ДШЭ-12 (масса ВВ ~ 0,4 г);  
 3 – бумажный картуз;  
 4 – центrovочный диск (диаметр диска 20 мм).

**Рис. 2.** Схема заряда.

Управление электронным ключом осуществлялось с помощью синхронизирующего импульса выдаваемого генератором импульсов. Синхронизация высокоскоростной видеокамеры также осуществлялась от генератора импульсов. Генератор импульсов работал в режиме однократно импульса с длительностью 1,5 с. Видеорегистрация осуществлялась с частотой съемки 245 кГц и временем экспонирования кадра 1 мкс в условия внешней подсветки. В качестве подсветки использовались два светодиодных прожектора LEDEKNano TESH 400 (300 Вт 51960лм).

**Численное моделирование.** Численное моделирование проводилось в конечно-элементном программном комплексе с использованием явного решателя [6]. Решение осуществлялось произвольным Лагранжево-Эйлеровым методом [7,8] на трехмерной сетке. Использовались трехмерные восьмиузловые элементы Solid 164 с заданием формулировки Лагранжа для описания трубы, и формулировки Эйлера - для описания тех частей, которые ведут себя как жидкость - воздух и заряд взрывчатого вещества. Так как объект исследования обладает осевой симметрией, то для расчета использовалась половина модели с указанием соответствующих граничных условий в плоскости симметрии. Вид расчетной модели показан на рисунке 3.



**Рис. 3.** Расчетная модель: 1 – труба, 2 – заряд, 3 – объем воздуха.

Количество ячеек, описывающих объем трубы, составляет 48400. Минимальный размер ячейки, описывающей объем трубы, составляет 0,5 мм. Общее количество ячеек, принятое для описания данной задачи, составляет 379542.

Система уравнений, описывающих течение среды [7], имеет вид

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \rho (\mathbf{v} - \mathbf{u}) + \rho \operatorname{div} \mathbf{v} = 0 \\ \rho \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \rho \nabla \mathbf{v} (\mathbf{v} - \mathbf{u}) = \operatorname{div} \sigma \\ \rho \frac{\partial E}{\partial t} + \rho \nabla E (\mathbf{v} - \mathbf{u}) = \sigma \cdot \dot{\varepsilon} \end{array} \right. \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность среды,  $\mathbf{v}$  – вектор скорости среды,  $\mathbf{u}$  – вектор скорости узлов сетки,  $\sigma$  – тензор напряжений,  $\dot{\varepsilon}$  – тензор скоростей деформаций,  $E$  – внутренняя энергия,  $t$  – текущее время.

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

$$\begin{aligned} \sigma_{ij} &= -p \cdot \delta_{ij} + s_{ij} \\ p &= p(\rho, e), \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\sigma_{ij}$  – тензор напряжений,  $s_{ij}$  – девиатор тензора напряжений,  $\delta_{ij}$  – символ Кронекера,  $p$  – гидростатическое давление, заданное УРС.

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

Характер деформирования материала трубы описывался упругопластической моделью деформирования с изотропным упрочнением.

В области упругих деформаций поведение материала трубы описывалась обобщенным законом Гука

$$\begin{aligned} \sigma_{ij} &= \frac{E}{1+\nu} \left( \varepsilon_{ij} + \frac{\nu}{1-2\nu} \varepsilon_{ij} \delta_{ij} \right) \\ s_{ij} &= 2G \varepsilon_{ij}, \\ p &= -K \frac{\Delta V}{V} \end{aligned} \quad (3)$$

где  $E$  – модуль упругости,  $\nu$  – коэффициент Пуассона  $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$  – модуль сдвига,

$\varepsilon_{ij}$  – девиатор тензора деформаций,  $s_{ij}$  – девиатор тензора напряжений,  $p$  – гидростатическое давление,  $\frac{\Delta V}{V}$  – объемная деформация,  $K = \frac{E}{3(1-2\nu)}$  – модуль

объемного сжатия

В пластической области деформирования поверхность текучести описывалась поверхностью текучести Мизеса:

$$\frac{3}{2} s_{ij} s_{ij} - \sigma_y^2 \leq 0 \quad (4)$$

где  $\sigma_y$  – напряжение текучести материала.

Пластические свойства описывались моделью, имеющей следующий вид:

$$\sigma_y = (\sigma_0 + E_{\text{tan}} \cdot \varepsilon^{p^n}) \cdot (1 + c \cdot \ln \dot{\varepsilon}_*^p) \left( 1 - \left[ \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right]^m \right) \quad (5)$$

где  $\sigma_0$  – предел текучести материала,  $\varepsilon^p$  – пластическая деформация,  $E_{\text{tan}}$  – модуль упрочнения,  $\dot{\varepsilon}_*^p = \dot{\varepsilon}^p / \dot{\varepsilon}_0^p$  – безразмерная скорость эффективной пластической деформации,  $\dot{\varepsilon}_0^p = 1 \text{ c}^{-1}$ ,  $T^* = \frac{T - T_r}{T_m - T_r}$ ,  $T_r$  – комнатная температура;  $T_m$  – температура плавления;  $C, n, m$  – параметры.

Для определения зависимости  $p = p(\rho, E)$  использовалось УРС Грюнайзена [6] вида:

$$p = \frac{\rho_0 c_0^2 \mu \left[ 1 + \left( 1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu \right]}{[1 - (S_1 - 1) \mu]^2} + \gamma_0 e \quad (6)$$

где  $\rho_0$  – начальная плотность,  $\mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1$  – относительное изменение объема,  $\gamma_0$  – постоянная Грюнайзена,  $S_1$  – коэффициенты выражения ударной адиабаты вещества ( $D = c_0 + S_1 u$ ,  $D$  – скорость фронта ударной волны,  $c_0$  – объемная скорость звука,  $u$  – массовая скорость вещества),  $e$  – внутренняя энергия на единицу объёма. Параметры модели деформирования для материала трубы приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Параметры модели деформирования материала трубы

Обозначение параметра	$\sigma_0$ , МПа	$E_{\text{tan}}$ , МПа	C	n	m	$T_r$ , К	$T_m$ , К
АМг5	160	533	0,015	0,26	1	293	933

Параметры УРС материалов трубы в соответствии с экспериментальными данными по ударному сжатию [9] и приведены в таблице 2.

Таблица 2.

Параметры УРС материалов

Название параметра	Плотность $\rho_0$ , $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	Объемная скорость звука $c_0$ , $\frac{\text{км}}{\text{с}}$	Коэффициент Грюнайзена $\gamma_0$	Параметр $S_1$
АМг5	2640	5,5	2	1,3

Принятые физико-механические свойства материала трубы приведены в таблице 3.

Таблица 3.

Физико-механические свойства материалов

	Плотность, $\text{кг/м}^3$	Модуль упругости $E$ , МПа	Коэффициент Пуассона $\nu$
АМг5	2640	$0,7 \cdot 10^5$	0,3

Воздух в расчете подразумевался идеальной средой без учета вязкостных свойств. Состояние определяется только гидростатическим давлением

$$p = (\kappa - 1) \frac{\rho}{\rho_0} E \quad (7)$$

где  $\kappa = 1,4$  – показатель адиабаты,  $E$  – внутренняя энергия на единицу объема,  $\rho_0$  – начальная плотность. Плотность воздуха  $\rho_0 = 1,225 \text{ кг/м}^3$ .

Для задания материалов заряда использовалась специальная модель взрывчатого вещества, позволяющая моделировать детонацию и течение продуктов взрыва [6]. Давление в элементе ВВ в каждый момент времени определяется по формуле

$$p = F \cdot p(\rho, e), \quad (8)$$

где  $F = \max(F_1, F_2)$  – доля выгорания взрывчатого вещества,  $F_1 = \frac{\rho \cdot D^2}{P_{CJ}} \left(1 - \frac{V}{V_0}\right)$ ,

$F_2 = \frac{2D(t - t_b)}{3\Delta x}$ ,  $\rho$  – плотность ВВ,  $D$  – скорость детонации,  $P_{CJ}$  – давление Чепмена-Жуге,  $t_b$  – время выгорания элемента,  $\Delta x$  – характерный размер элемента.

УРС для продуктов детонации ВВ принято в форме Джонса-Уилкинса-Ли [6,10]:

$$p(\rho, E) = A \cdot \left(1 - \frac{\omega}{R_1 \cdot V}\right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 \cdot V}\right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega \cdot e}{V}, \quad (9)$$

где  $V = \frac{\rho_0}{\rho}$  – относительный объем продуктов детонации ВВ в процессе взрыва,

$A, B, R_1, R_2, \omega$  – эмпирические константы,  $e$  – внутренняя энергия в единице объема,  $\omega = -\left(\frac{\partial \ln p}{\partial \ln V}\right)_S - 1$  – при расширении продуктов взрыва до величины  $V > 10$ ,  $S$  – энтропия.

Уравнению (9) соответствует изоэнтропа продуктов взрыва:

$$p_s = A \cdot e^{-R_1 V} + B e^{-R_2 V} + C \cdot V^{-(1+\omega)} \quad (10)$$

Состав ВС-2 при моделировании был заменен тротильным эквивалентом. Масса тротильного эквивалента при взрыве в воздухе определялась по формуле [11]:

$$m_{\text{ТНТ}} = m_{\text{ВС-2}} \sqrt{Q_{\text{ВС-2}} / Q_{\text{ТНТ}}} \quad (11)$$

где  $m_{\text{ВС-2}} = 45 \text{ мг}$  – масса состава ВС-2, используемая в эксперименте,  $Q_{\text{ВС-2}} = 2250000 \text{ Дж/кг}$ ,  $Q_{\text{ТНТ}} \approx 4232000 \text{ Дж/кг}$ .

Таким образом,  $m_{\text{ТНТ}} = 33 \text{ мг}$ .

Параметры модели материала ВВ, принятые в соответствии с [12] приведены в таблице 4.

**Таблица 4.**

Параметры модели материала ВВ

	Плотность ВВ $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Скорость детонации $D$ , км/с	Давление Чепмена-Жуге, $P_{CJ}$ , ГПа
ТНТ	1630	6,93	21
ТЭн	1770	8,30	33,5

Параметры УРСВВ взяты в соответствии с [12] и приведены в таблице 5.

Таблица 5.

Параметры уравнения состояния продуктов детонации ВВ

	A, ГПа	B, ГПа	$R_1$	$R_2$	$\omega$
ТНТ	371,2	3,231	4,15	0,95	0,3
ТЭн	617	16,926	4,4	1,2	0,25

**Результаты численного моделирования и эксперимента.** На рис. 4 приведен внешний вид трубы после нагружения, полученный в численном расчете и эксперименте.

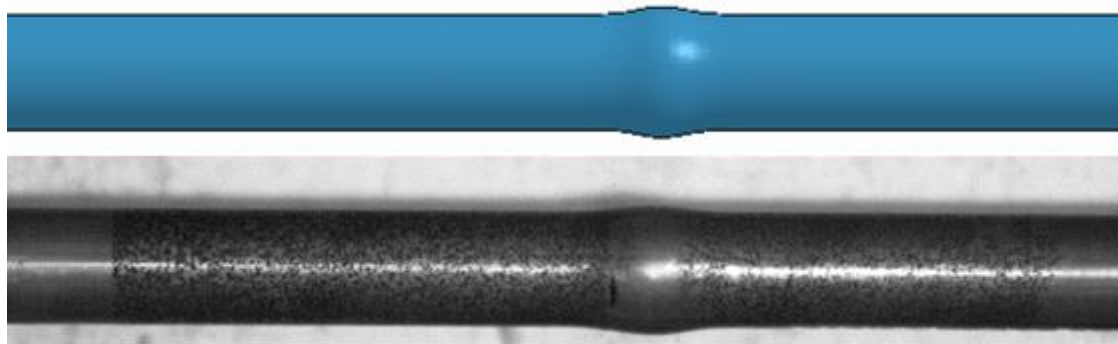


Рис.4. Деформированный вид трубы.

В месте установки заряда труба приобрела бочкообразную форму. По результатам видеорегистрации наблюдается зона деформации трубы протяженностью 30 мм с максимальным увеличением диаметра до величины 27,5 мм. Наибольший диаметр в численном расчете составил 28,3 мм. Разрушения стенки трубы не произошло.

#### Список литературы

1. Кравчук А.С., Чашинский А.С., Кравчук А.И. Основные элементы графического интерфейса LS-PREPOST. - Минск: БГУ, 2013.
2. Илюшин М.А., Целинский И.В., Судариков А.М. и др. Разработка компонентов высокоэнергетических композиций / Под ред. Целинского И.В. - СПб: ГТИ (ТУ), 2006. - 150с.
3. Илюшин М.А., Целинский И.В. // Патент на изобретение RU № 2 225 840 C2, (C1 7C01 G13/00), 2004 ; Илюшин М.А., Угрюмов И.А., Долматов В.Ю., Веретенникова М.В. // Патент на изобретение RU № 2 309 139 C2, (C1C06B 43/00; C06B 45/30; C06C 7/00), 2006.
4. Герасимов С.И., Илюшин М.А., Кузьмин В.А. Возможность инициирования полимерсодержащего энергонасыщенного состава комплексного перхлората ртути лучом лазерного диода // Письма в Журнал технической физики. - 2015. - Т. 41. - С. 66 - 72.
5. Герасимов С.И. [и др.]. Устройство для инициирования зарядов взрывчатых веществ // Патент РФ: МПК F42B3/113, F42C 13/02 / Герасимов С.И.[и др.]. № 2015112908; заявл. 08.04.15; опубл. 10.11.16, Бюл. № 31. 6 с.
6. Hallquist J.O. LS-DYNA: Theoretical manual. Livermore Software Technology Corporation. – Livermore: 1998. - 498 p.

7. Souli M. LS-Dyna Advanced Course in ALE and Fluid/Structural Coupling. Course Note for Arbitrary Lagrangian-Eulerian Formulation Technique. Livermore, LSTC, CA, 2000.
8. Белоцерковский О.М., Давыдов Ю.М. Метод крупных частиц в газовой динамике. - М.: Наука, 1982.
9. Экспериментальные данные по ударно-волновому сжатию и адиабатическому расширению конденсированных веществ / Под ред. Р.Ф. Трунина, Л.Ф. Гударенко, М.В. Жерноклетова, Г.В. Симакова - 2-е изд., перераб. и доп. - Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2006.
10. Lee E, Finger M., Collins W. JWL equation of state coefficients for high explosives. Rept-UCID-16189, Lawrence Livermore National Laboratory, 1973.
11. Иванов А.Г. Разрушение разномасштабных объектов при взрыве. - Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2001. - 482 с.
12. Орленко Л.П. Физика взрыва. Изд. 3-е, испр. В 2 т. Т.1. - М.: Физматлит, 2004.

*Дата поступления: 11 марта 2020 г.*