

УДК 538.521

СКОРОСТЬ ДЕТОНАЦИИ ПИРОТЕХНИЧЕСКОГО СОСТАВА ВС-2 И ПАРАМЕТРЫ УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ПРОДУКТОВ ЕГО ВЗРЫВА В ФОРМЕ ДЖОНСА — УИЛКИНСА — ЛИ

С. И. Герасимов^{1,2,3,4}, П. Г. Кузнецов², В. А. Кузьмин^{1,4}, В. С. Роженцов¹,
Н. А. Трепалов¹, В. И. Ерофеев⁴

¹РФЯЦ, ВНИИ экспериментальной физики, 607190 Саров, s.i.gerasimov@mail.ru

²Саровский физико-технический институт — филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», 607186 Саров

³Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева
603950 Нижний Новгород

⁴Институт проблем машиностроения РАН — филиал Института прикладной физики РАН
603024 Нижний Новгород

Приведены значения скорости детонации в тонких слоях пиротехнического состава ВС-2. Определены параметры уравнения состояния продуктов взрыва в форме Джонса — Уилкинса — Ли. С использованием полученного уравнения состояния выполнены численные расчеты и сравнение с экспериментальными параметрами воздушной ударной волны, формируемой при инициировании состава ВС-2. Проведены расчетно-экспериментальные исследования по определению зависимости импульса давления от толщины слоя состава ВС-2. Определена зависимость плотности импульса продуктов взрыва от поверхностной плотности массы состава ВС-2.

Ключевые слова: скорость детонации, уравнение состояния в форме Джонса — Уилкинса — Ли, численное моделирование, удельный импульс.

DOI 10.15372/FGV20220211

ВВЕДЕНИЕ

Испытания конструкций на воздействие импульсных нагрузок часто проводятся с применением газодинамических методов с использованием энергии взрывчатых веществ. Для прогнозирования и расчета реакции конструкции на динамические воздействия активно применяются комплексы программ численного анализа с применением явных схем интегрирования дифференциальных уравнений сохранения массы, импульса и энергии, которые замыкают уравнение состояния вещества. Параметры уравнения состояния требуют верификации, чтобы получить адекватные результаты моделирования отклика конструкции на взрывное воздействие.

Работа посвящена определению скорости детонации и параметров уравнения состояния Джонса — Уилкинса — Ли [1–3] продуктов

взрыва светочувствительного пиротехнического состава ВС-2 (далее — состав ВС-2), верификации этих параметров по результатам взрывных экспериментов. Состав ВС-2 содержит 90 % комплексного перхлората ртути (II) [4] и 10 % ПВМТ (оптически прозрачного сополимера 2-метил-5-винилтетразола и метакриловой кислоты по ТУ 38-403-208-88). Подробно свойства состава ВС-2 описаны в работе [5].

1. ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА И РЕЗУЛЬТАТЫ

Для определения скорости детонации состава ВС-2 были проведены эксперименты [6] с инициированием последнего излучением газоразрядного излучателя ЭВИС-3. Газоразрядный излучатель ЭВИС-3 (яркостная температура $\approx 1.2 \cdot 10^4$ К, плотность мощности излучения вблизи источника $\approx 10^4$ Вт/см²) [7] представляет собой две параллельные пластины из оргстекла с зазором 0.1 мм, в котором расположены два электрода на расстоянии 90 мм, соединенных стримерной дорожкой (металлизированная лавсановая пленка толщиной

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 20-19-00613).

© Герасимов С. И., Кузнецов П. Г., Кузьмин В. А.,
Роженцов В. С., Трепалов Н. А., Ерофеев В. И., 2022.

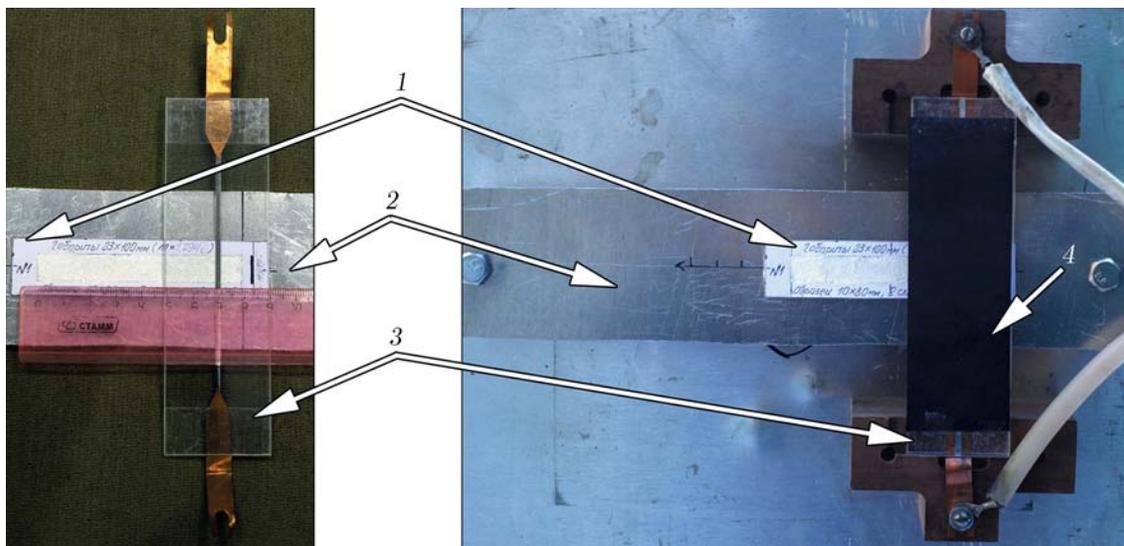


Рис. 1. Внешний вид сборки № 1 и ее расположение относительно испытательного оборудования: 1 — сборка, 2 — пластина-свидетель, 3 — газоразрядный излучатель, 4 — оптически непрозрачный материал

≈1 мкм). Испытывались четыре экспериментальные сборки, каждая из которых состояла из полоски состава ВС-2 размером 10 × 80 мм, нанесенного на полированную фольгу (ГОСТ 1018-2015) размером 23 × 100 × 0.15 мм. Толщина нанесенного состава ВС-2 примерно равнялась 0.55 мм (сборки № 1, 2) и 0.82 мм (сборки № 3, 4). Объект и средства испытаний представлены на рис. 1. Экспериментальная сборка 1 с помощью липкой ленты крепилась на пластине-свидетеле 2, представляющей собой лист алюминия размером 60 × 300 × 4 мм. Экспериментальная сборка устанавливалась составом ВС-2 к газоразрядному излучателю ЭВИС-3 3 на удалении ≈14 мм, противоположная сторона излучателя была закрыта оптически непрозрачным материалом 4 с целью исключения влияния работы ЭВИС-3 на результат оптической регистрации. Стример газоразрядного излучателя находился на расстоянии 10 мм от края полоски с составом ВС-2.

Задействование газоразрядного излучателя ЭВИС-3 осуществлялось с помощью накопителя с энергией разрядного контура 150 Дж. Распространение фронта детонационной волны регистрировалось электронно-оптической камерой НАНОГЕЙТ-22 [8] в дискретные моменты времени относительно подачи сигнала на запуск газоразрядного излучателя ЭВИС-3 при времени экспонирования кадра 20 нс. С помощью цифрового осциллографа и фотоприем-

ника осуществлялось хронографирование времени срабатывания газоразрядного излучателя относительно его сигнала запуска, среднее значение которого по четырем экспериментам составило 3.2 мкс.

На рис. 2 приведены фрагменты регистрации распространения детонационного фронта в эксперименте со сборкой № 1. Фронт детонационной волны искривлен и изменяется во времени. Среднее экспериментальное значение скорости перемещения фронта детонационной волны составило 4375 и 4505 м/с для состава ВС-2 толщиной 0.55 мм, а для состава ВС-2 толщиной 0.82 мм — 4221 и 4281 м/с. На основании полученных результатов можно предположить, что на скорость детонации более тонких пленок оказывает дополнительное влияние скорость звука в подложке (≈5000 м/с).

2. УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ПРОДУКТОВ ВЗРЫВА СОСТАВА ВС-2

Для оценки действия продуктов взрыва (ПВ) на конструкцию требуется задание уравнения состояния (УРС). Для описания поведения ПВ в различных источниках [2, 3, 9] предлагается использовать следующие УРС.

Калорическое уравнение состояния ПВ:

$$\tilde{p} = A\rho^n + (\gamma - 1)\rho e, \quad (1)$$

где \tilde{p} — давление ПВ; A , n — постоянные, значения которых определяются из условий в точ-

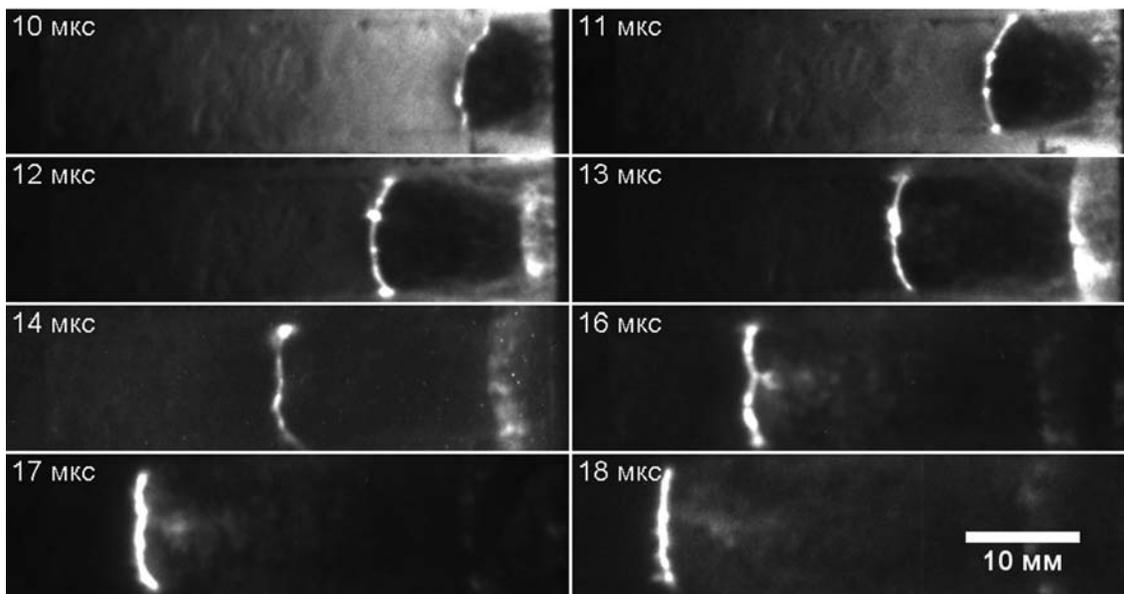


Рис. 2. Кадры регистрации распространения детонационного фронта

ке Жуге; ρ — плотность ПВ; γ — показатель изоэнтропы ПВ в области низких давлений (для конденсированных взрывчатых веществ (ВВ) можно принять γ в диапазоне $1.2 \div 1.33$); e — удельная энергия на единицу массы.

В современных комплексах численного анализа для описания поведения ПВ ВВ принято УРС в форме Джонса — Уилкинса — Ли (далее по тексту УРС JWL) [1]:

$$p_{\text{jwl}} = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) \exp(-R_1 V) + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) \exp(-R_2 V) + \frac{\omega E}{V}, \quad (2)$$

где A , B , R_1 , R_2 , ω — эмпирические константы; $V = \rho_0/\rho$ — относительный объем продуктов взрыва ВВ; ρ_0 — начальная плотность ВВ; $\omega = - \left(\frac{\partial \ln p}{\partial \ln V} \right)_s - 1$; E — внутренняя энергия в единице объема.

При использовании уравнения (2) задается также начальная удельная внутренняя энергия $E_0 = \rho_0 Q$, где Q — теплота взрывного превращения (калорийность взрыва). УРС в форме (2) хорошо описывает поведение ПВ при их сильном расширении до значений $V > 10$. Для ряда наиболее распространенных ВВ параметры УРС JWL (2) можно найти в некоторых источниках, например в [2].

Для новых составов параметры УРС JWL неизвестны. В работе [10] предлагается находить параметры по характеристикам γ , k , ρ_0 , D , Q и УРС (1).

Показатель изоэнтропы ПВ k вычисляется по формуле [10, 11]

$$k = 1.33 + 1.1\rho_0, \quad (3)$$

где ρ_0 — начальная плотность ПВ, принимаемая равной плотности ВВ, г/см^3 .

Константы УРС (1) вычисляются следующим образом [9, 10]:

$$n = 1 + \frac{(k - \gamma)p_{\text{cj}}}{p_{\text{cj}} - (\gamma - 1)\rho_{\text{cj}}e_{\text{cj}}}, \quad (4)$$

$$A = \frac{p_{\text{cj}} - (\gamma - 1)\rho_{\text{cj}}e_{\text{cj}}}{(\rho_{\text{cj}})^n}, \quad (5)$$

$$p_{\text{cj}} = \frac{\rho_0 D^2}{k + 1}, \quad \rho_{\text{cj}} = \frac{k + 1}{k} \rho_0, \quad (6)$$

$$e_{\text{cj}} = \frac{p_{\text{cj}}(1/\rho_0 - 1/\rho_{\text{cj}})}{2} + Q.$$

Параметр ω в УРС JWL (2) находится по формуле

$$\omega = \gamma - 1, \quad (7)$$

где $\gamma = \text{const}$.

В интервале $\rho_1 < \rho < \rho_i$ параметры УРС JWL определяются при условии минимума невязки $(p_{jwl} - \tilde{p})^2$. При этом сделано допущение, что показатель изоэнтропы ПВ в области низких давлений для состава ВС-2 равен $\gamma = 1.27$, что не противоречит имеющимся в литературе данным [2]. Тогда согласно (7) $\omega = 0.27$.

Характеристики состава ВС-2 приняты следующими: скорость детонации $D = 4500$ м/с, плотность $\rho_0 = 1433$ кг/м³. С использованием формул (3)–(6) были определены параметры УРС (1) для ПВ состава ВС-2:

$$\tilde{p} = 1.81\rho^{2.906} + 0.27\rho e. \quad (8)$$

Результаты, полученные для первого слагаемого в выражении (8) в интервале $\rho = 40 \div 1900$ кг/м³, приведены на рис. 3 (см. точки 1). Здесь же представлена их аппроксимация зависимостью

$$f = A \left(1 - \frac{0.27\rho}{1433R_1} \right) \exp \left(-R_1 \frac{1433}{\rho} \right) + B \left(1 - \frac{0.27\rho}{1433R_2} \right) \exp \left(-R_2 \frac{1433}{\rho} \right) \quad (9)$$

(линия 2 на рис. 3). Коэффициенты аппроксимации A , B , R_1 , R_2 были определены методом регрессионного анализа с использованием Mathcad: $A = 196.569$ ГПа, $B = 8.451$ ГПа, $R_1 = 5.041$, $R_2 = 1.54$. При таком подходе принимается, что последние слагаемые в выражениях

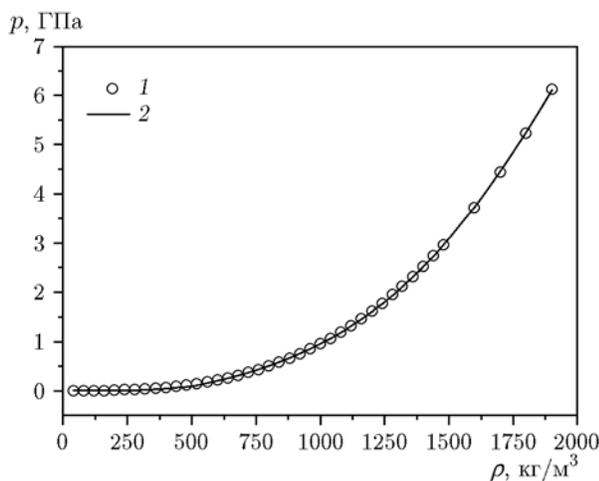


Рис. 3. Массив данных первого слагаемого давления (1) и аппроксимирующая зависимость (2)

(2) и (8), содержащие внутреннюю энергию, равны.

При этом погрешность определения параметров УРС JWL в большей степени обусловлена видом аппроксимирующей функции. В данном случае в интервале $\rho = 600 \div 1900$ кг/м³ относительная погрешность по давлению не превышала 3 %.

Полученные параметры УРС JWL справедливы для объемного заряда состава ВС-2.

3. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗРЫВА СОСТАВА ВС-2 В ВОЗДУХЕ

На основе экспериментальных данных о параметрах воздушной ударной волны (ВУВ), формируемой при инициировании состава ВС-2 [12], проведена валидация параметров УРС JWL для данного состава.

В экспериментах использовалась сборка, состоящая из состава ВС-2 массой ≈ 45 мг, помещенного в латунный колпачок (рис. 4).

Моделирование проводилось в конечно-элементном программном комплексе с применением явного решателя [13]. Решение осуществлялось в трехмерных эйлеровых сетках [14]. Использовались трехмерные восьмиузловые элементы типа Solid 164 с заданием формулировки Эйлера. Вид расчетной модели с указанием веществ показан на рис. 5.

Течение среды описывалось системой уравнений

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \rho(\mathbf{v}) + \rho \operatorname{div} \mathbf{v} = 0,$$

$$\rho \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \rho \nabla \mathbf{v}(\mathbf{v}) = \mathbf{F} + \operatorname{div} \sigma, \quad (10)$$

$$\rho \frac{\partial E}{\partial t} + \rho \nabla E(\mathbf{v}) = \sigma \dot{\epsilon},$$

где ρ — плотность среды, t — текущее время, \mathbf{v} — вектор скорости среды, \mathbf{F} — векторное поле массовых сил, σ — тензор напряжений, E — внутренняя энергия; $\dot{\epsilon}$ — тензор скоростей деформаций.

Напряженно-деформированное состояние в точке расчетной области определялось уравнениями

$$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + s_{ij}, \quad p = p(\rho, E), \quad (11)$$

где σ_{ij} — тензор напряжений, p — давление, заданное УРС, δ_{ij} — символ Кронекера, s_{ij} — девиатор тензора напряжений.

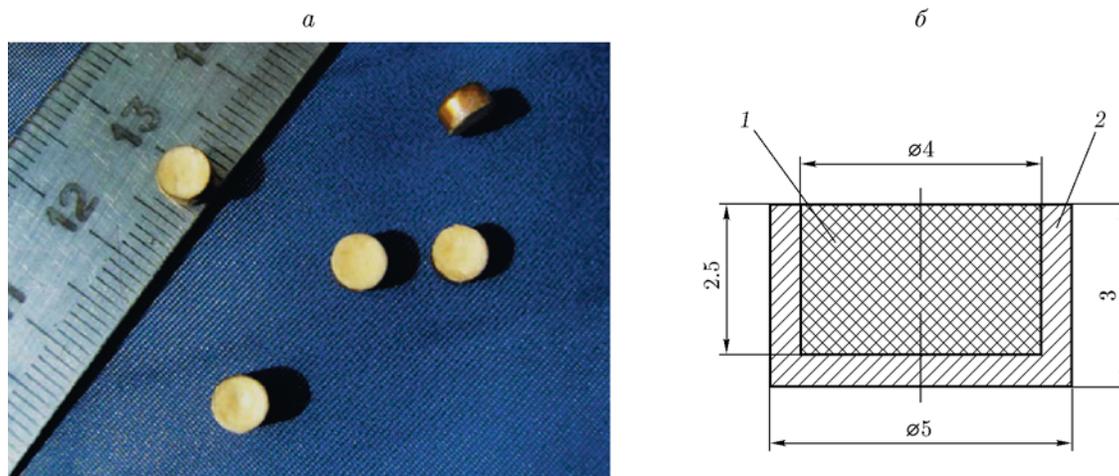


Рис. 4. Внешний вид (а) и схематичное изображение (б) сборки:

1 — состав ВС-2, 2 — латунный колпачок

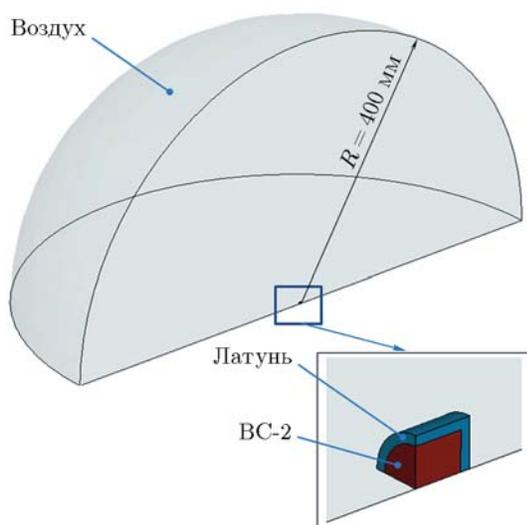


Рис. 5. Расчетная модель эксперимента

Каждой части расчетной модели ставилась в соответствие своя математическая модель материала, позволяющая адекватно описывать физический процесс.

Для латунного колпачка задавалась упругопластическая модель с изотропным упрочнением. Физико-механические свойства латуни Л85 заимствованы из работы [15]: плотность $\rho = 8750 \text{ кг/м}^3$, модуль упругости $E = 102900 \text{ МПа}$, коэффициент Пуассона $\nu = 0.3$, предел текучести $\sigma_y^0 = 98 \text{ МПа}$, модуль упрочнения $E^{tan} = 288 \text{ МПа}$.

Воздух задавался моделью материала без учета вязкости. Уравнение состояния воздуха

соответствовало уравнению состояния идеального газа:

$$p = (k_a - 1) \frac{\rho}{\rho_0} E, \quad (12)$$

где $k_a = 1.4$ — показатель адиабаты Пуассона, ρ_0 — начальная плотность, E — внутренняя энергия на единицу объема. Плотность воздуха в невозмущенной области атмосферы при температуре окружающей среды 6°C и при атмосферном давлении в невозмущенной области 99125.2 Па (в соответствии с [16]) составляла $\rho_{\text{атм}} = 1.238 \text{ кг/м}^3$.

Для продуктов детонации ВВ принято УРС JWL (2).

Параметры модели материала состава ВС-2 приняты в соответствии с экспериментальными данными и вычислены по формулам (6).

На рис. 6 показана картина распределения давления в численном расчете, соответствующая тому же моменту времени, что и фронт ВУВ, визуализированный в эксперименте [12]. На начальном этапе распространения ВУВ наблюдается несферичность фронта, так же как и при численном моделировании. Зависимости избыточного давления во фронте ВУВ, полученные в эксперименте и при численном моделировании, показаны на рис. 7. При этом экстраполяция избыточного давления во фронте ВУВ получена на основании приведенного в работе [12] уравнения, описывающего распространение фронта ВУВ в зависимости от расстояния, путем вычисления скорости ВУВ и определения соответствующего давления.

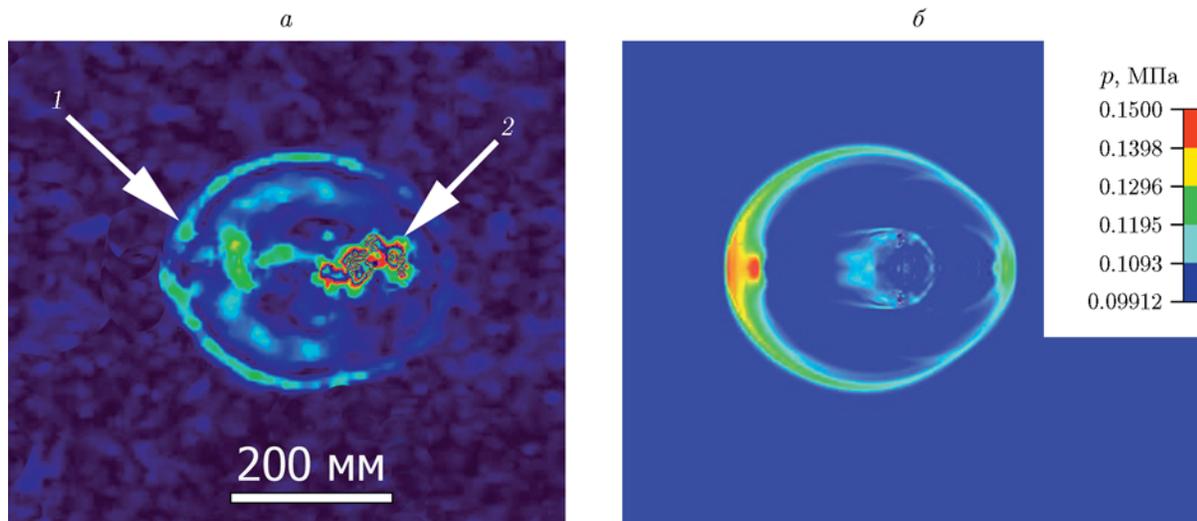


Рис. 6. Визуализация фронта ВУВ в эксперименте (а) и при численном моделировании (б) в момент времени 0.26 мс после инициирования состава ВС-2:

1 — фронт ВУВ, 2 — продукты взрыва

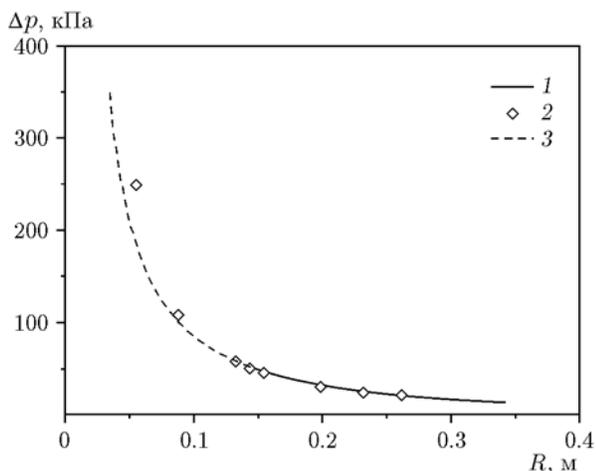


Рис. 7. Зависимость избыточного давления во фронте ВУВ:

1 — экспериментальные данные, 2 — результаты численного моделирования, 3 — экстраполяционная кривая

4. ЗАВИСИМОСТЬ ИМПУЛЬСА ДАВЛЕНИЯ ОТ ТОЛЩИНЫ СЛОЯ СОСТАВА ВС-2

В работе [17] приведена зависимость импульса давления от толщины слоя при контактном взрыве светочувствительного состава на основе перхлората гидразинотетразола ртути — компонентов, входящих в состав ВС-2.

Были выполнены расчетно-экспериментальные исследования по определению зависимости импульса давления от толщины слоя со-

става ВС-2. В численных расчетах использовались полученные параметры УРС JWL состава ВС-2. Экспериментальные исследования проводились путем метания стального диска продуктами взрыва состава ВС-2. Движение диска регистрировалось высокоскоростной видеокамерой с частотой съемки 5.1 кГц и временем экспонирования кадра 0.1 мс. В качестве объекта испытания использовалась сборка (рис. 8), состоящая из стального диска (3) и закрепленного на его торцевой поверхности полированного алюминиевого листа (1) с нанесенным составом ВС-2 (2). Площадь состава ВС-2 была фиксированной и составляла 80 мм². Толщина состава ВС-2, нанесенного на два стальных диска массой 67 г (далее называем пластинкой 1) и 105 г (пластинка 2), составляла 0.27, 0.55 и 0.82 мм (см. таблицу). Облучение состава ВС-2 осуществлялось лазерным диодом в режиме моноимпульса длительностью 1 с.

В качестве примера на рис. 9 представлены кадры скоростной видеорегистрации процесса метания пластины 2 продуктами взрыва состава ВС-2 различной толщины. Кадры получены в момент времени 20 мс относительно момента инициирования состава ВС-2.

На основе результатов высокоскоростной видеорегистрации пластины, метаемой продуктами взрыва, проведена оценка ее перемещения h в вертикальном направлении. Зависимость перемещения пластины от времени в экспериментах представлена на рис. 10,

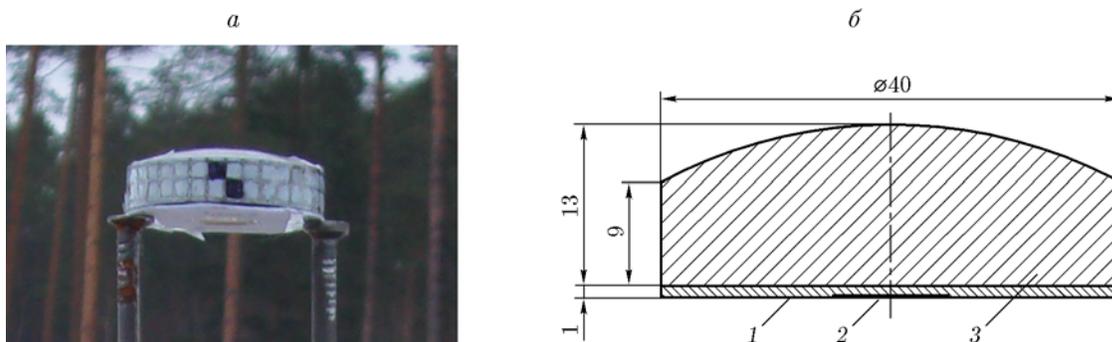


Рис. 8. Внешний вид (а) и габаритные размеры (б) метаемой пластины 2:
1 — алюминиевый лист, 2 — состав ВС-2, 3 — стальной диск

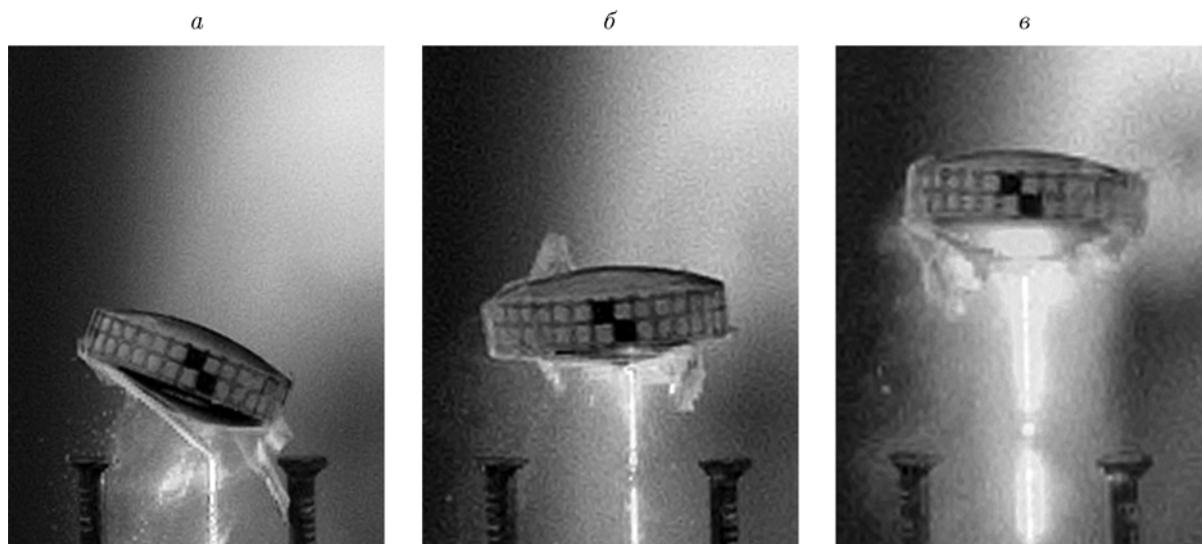


Рис. 9. Положение метаемой пластины 2 в пространстве через 20 мс после инициирования состава ВС-2 толщиной 0.27 (а), 0.55 (б), 0.82 мм (в)

Данные экспериментов

Номер эксперимента	Пластина	m , г	$\delta_{\text{ВВ}}$, мм	v_0 , м/с	J_s , кПа·с
1	1	67	0.27	1.139	1.0
2			0.55	1.679	1.4
3			0.82	2.722	2.3
4	2	105	0.27	0.676	0.9
5			0.55	1.030	1.4
6			0.82	2.175	2.9

где $t = 0$ — момент инициирования состава ВС-2. Путем аппроксимации экспериментальных данных уравнением равнозамедленного движения определена начальная скорость движения метаемой пластины v_0 . Ее значения использовались для определения плотности импульса ПВ с учетом известной плотности состава ВС-2, его толщины и площади нанесения. Полученные значения приведены в таблице и на рис. 11. Экспериментальные зависимости плотности импульса продуктов взрыва от поверхностной плотности массы состава ВС-2 на метаемых пластинах 1 и 2 (точки 1, 2 соответственно) хорошо согласуются с расчетными

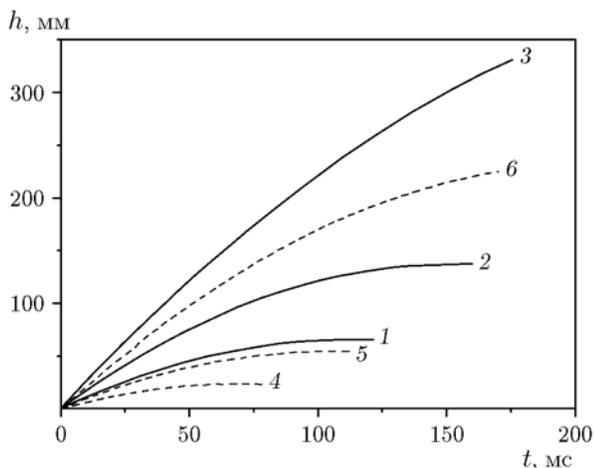


Рис. 10. Данные по перемещению метаемых пластин в экспериментах: номера кривых соответствуют номерам экспериментов в таблице

значениями, за исключением данных эксперимента 6. Возможной причиной данного отклонения может быть различие в качестве нанесения состава ВС-2 (рис. 12).

Обработка полученных экспериментальных данных (за исключением данных эксперимента 6) и результатов численного моделирования методом наименьших квадратов позволила построить для состава ВС-2 следующую зависимость:

$$J_s = 17.31m_s - 0.16, \quad (13)$$

где J_s — плотность импульса продуктов взрыва, кПа·с; $m_s = \rho_{ВВ}\delta_{ВВ}$ — поверхностная

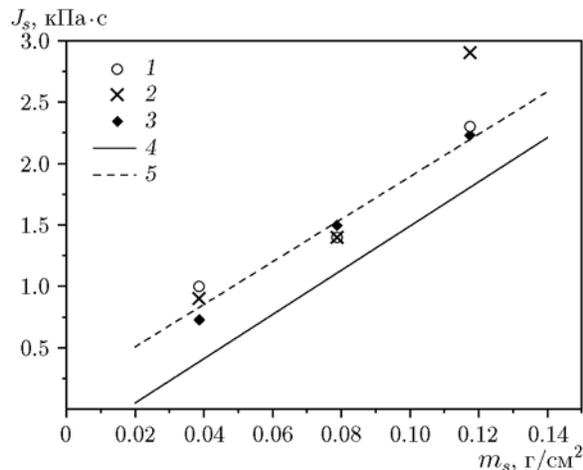


Рис. 11. Зависимость плотности импульса продуктов взрыва (J_s) от поверхностной плотности массы (m_s) состава ВС-2:

1, 2 — экспериментальные значения, 3 — результаты численного моделирования, 4 — данные [17], 5 — аппроксимация массива расчетных и экспериментальных данных

плотность состава ВС-2, г/см²; $\rho_{ВВ}$ — плотность состава ВС-2, г/см³; $\delta_{ВВ}$ — толщина слоя состава ВС-2, см.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены результаты определения параметров УРС JWL продуктов взрыва состава ВС-2 путем аппроксимации данных, полученных с использованием простого калорического УРС, с применением регрес-

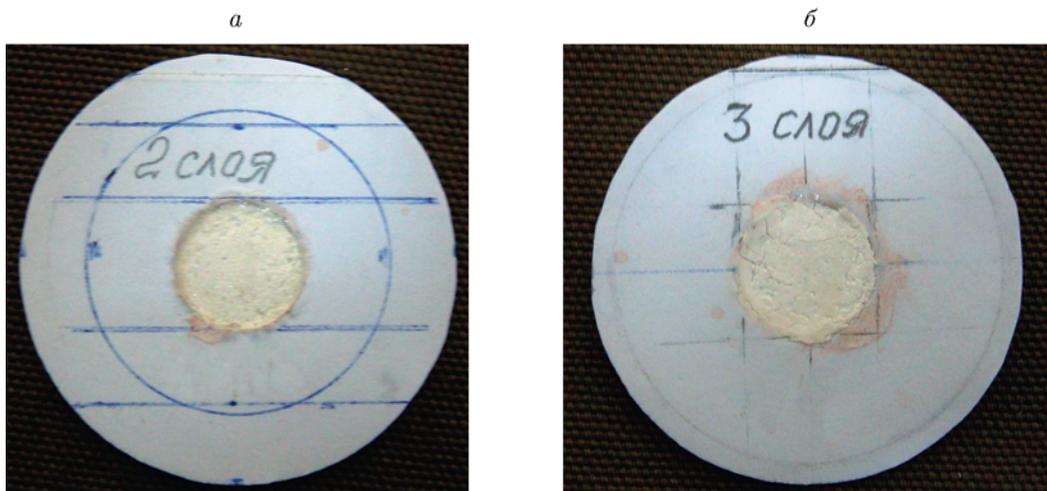


Рис. 12. Внешний вид пластины состава ВС-2 при проведении экспериментов 5 (а) и 6 (б)

сионного анализа. Проведен расчет инициирования состава ВС-2 в воздухе с использованием УРС JWL, получена зависимость избыточного давления во фронте ВУВ от расстояния. Данные численного моделирования хорошо согласуются с экспериментом.

Для уточнения зависимости импульса давления от толщины слоя состава ВС-2 при контактном взрыве проведены эксперименты и расчеты с использованием полученных параметров УРС JWL. Установлена линейная зависимость импульса давления от толщины состава ВС-2.

ЛИТЕРАТУРА

1. Уртъев П., Хейез Б. Параметрическое исследование динамических уравнений Джоунса — Уилкинса — Ли для продуктов детонации // Физика горения и взрыва. — 1991. — Т. 27, № 4. — С. 126–137.
2. Физика взрыва: в 2 т. / под ред. Л. П. Орленко. — Изд. 3-е, испр. — М.: Физматлит, 2004. — Т. 1.
3. Баум Ф. А., Орленко Л. П., Станюкович К. П., Челышев В. П., Шехтер Б. И. Физика взрыва. — М.: Наука, 1986.
4. Пат. РФ № 2225840С2 от 20.03.2004. (С1 7С01 G13/00), 2004. Способ получения перхлората 5-гидразинотетразолртути (II) / Илюшин М. А., Целинский И. В.
5. Илюшин М. А., Судариков А. М., Целинский И. В., Смирнов А. В., Чернай А. В., Шугалей И. В. Металлокомплексы в высокоэнергетических композициях / под ред. И. В. Целинского. — СПб.: ЛГУ им. А. С. Пушкина, 2010.
6. Герасимов С. И., Илюшин М. А., Кузнецов П. Г., Путис С. М., Душенок С. А., Роженцов В. С. Инициирование детонации световым импульсом в тонком заряде пиротехнического состава ВС-2 // Письма в ЖТФ. — 2021. — Т. 47, № 3. — С. 11–13.
7. Герасимов С. И., Файков Ю. И., Холин С. А. Кумулятивные источники света. — Саратов: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2002.
8. Электронно-оптическая восьмиканальная камера НАНОГЕЙТ-22: руководство по эксплуатации. — 2013.
9. Охитин В. Н., Меньшаков С. С. Фугасное действие боеприпасов: учеб. пособ. — Изд. 2-е, испр. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2018.
10. Колпаков В. И. Определение констант уравнения состояния продуктов детонации в форме Джонса — Уилкинса — Ли // Изв. Рос. акад. ракетных и артиллерийских наук. — 2016. — Т. 4, № 94. — С. 87–92.
11. Экспериментальные методы физики взрыва и удара / под ред. В. В. Селиванова. — М.: Физматлит, 2013.
12. Герасимов С. И., Трепалов Н. А. Видеорегистрация воздушной ударной волны при инициировании светочувствительного взрывчатого состава // Физика горения и взрыва. — 2019. — Т. 55, № 5. — С. 101–108. — DOI: 10.15372/FGV20190512.
13. Дьянов Д. Ю., Казанцев А. В., Морозов С. В. и др. Пакет программ ЛОГОС. Функциональные возможности для решения связанных задач прочности и гидродинамики сглаженных частиц // XV Междунар. конф. «Супервычисления и математическое моделирование». — Саратов: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2014. — С. 241–246.
14. Белоцерковский О. М., Давыдов Ю. М. Метод крупных частиц в газовой динамике. — М.: Наука, 1982.
15. Конструкционные материалы: справочник / под общ. ред. Б. Н. Арзамасова. — М.: Машиностроение, 1990.
16. ГОСТ 4401-81. Атмосфера стандартная. Параметры. — М.: Изд-во стандартов, 1981.
17. Бакулин В. Н., Грибанов В. М., Острик А. В., Ромадинова Е. А., Чепрунов А. А. Механическое действие рентгеновского излучения на тонкостенные композитные конструкции. — М.: Наука, 2008.

Поступила в редакцию 22.03.2021.

После доработки 20.07.2021.

Принята к публикации 26.08.2021.