

Numerical Simulation of Explosive Device Laser Ignition

A.A. Chesnokov, S.E. Kuratov

FSUE All-Russian Scientific Research Institute of Automatics, Moscow, 127055, Russia
syfjet@gmail.com

Abstract

This work presents method of calculation of the 2D hydrodynamics flow for laser ignition explosive device. Numerical results were compared with experimental data.

Keywords: laser ignition, explosives, numeric modeling.

The laser imitation of process in high-energy materials has received much attention, which is related to promising application of this phenomenon. In this context, an important task is the development of numerical simulation. In an article we present the numerical analysis of physical process in laser detonator (fig. 1). The model Saenz-Stewart of the explosive decomposition reaction of PETN is used. Our method includes the calculation of laser beam absorption. Numerical results and experimental data are in satisfactory agreement (fig. 2). We discuss perspectives for improvement of our numerical method. The obtained results show evidence for prospects of the practical implementation of our numerical method.

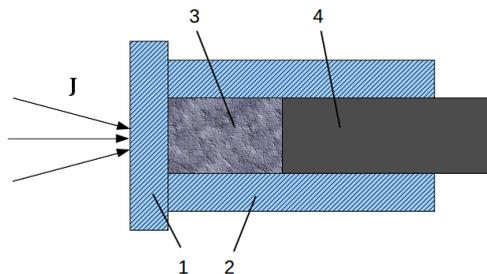


Fig. 1. Scheme device. 1 – glass, 2 – plexiglass, 3 – PETN, 4 – block

Equation kinetics and compaction for PETN

(model Saenz-Stewart)

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = k_{\varphi} (P - P_0 - P_h) \left[1 - \sqrt{\frac{\varphi_0 (1 - \varphi)}{\varphi (1 - \varphi_0)}} \right]$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} = H (P - P) k (P / P_{cj})^{\mu} (1 - \alpha)^{\nu}$$

$$k(\varphi_0) = d_1 \exp(a_1 \varphi_0^2 - b_1 \varphi_0 + c_1)$$

$$\mu(\varphi_0) = a_2 \varphi_0^2 - b_2 \varphi_0 + c_2$$

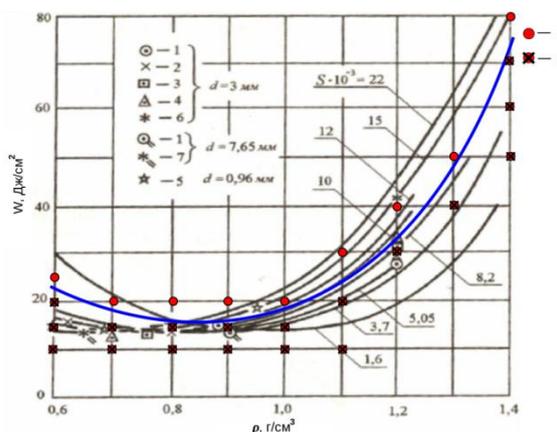


Fig. 2. Minimal energy density incident laser beam for wide range density of PETN. Red point -numerical simulation. (Solid – detonation, crossed-point – not detonation). Black lines - experiment, blue line – numerical curve

УДК 544.032.65

Численное моделирование лазерного инициирования взрывных сборок

А.А. Чесноков, С.Е. Куратов

ФГУП Всероссийский Научно-Исследовательский Институт Автоматики им. Н.Л. Духова,
Россия, Москва, 127055, ул. Суцневская, 22
syfjet@gmail.com

Аннотация

В работе представлена методика расчёта двумерных гидродинамических течений при лазерном инициировании взрывных конструкций, содержащих пентрит. Полученные численные результаты сопоставляются с экспериментальными данными.

Ключевые слова: пентрит, лазерное инициирование, детонация.

1. Введение

Для оптимизации конструкции лазерного детонатора, входящего в систему лазерного инициирования взрывчатых веществ (ВВ), проводятся как экспериментальные, так и теоретические исследования [1]. Одним из экспериментальных методов исследования лазерного инициирования ВВ [2], является исследование взрывных конструкций, состоящих из корпуса, прозрачной подложки, и пуансона, обеспечивающего удержание ВВ с противоположной стороны (рис. 1).

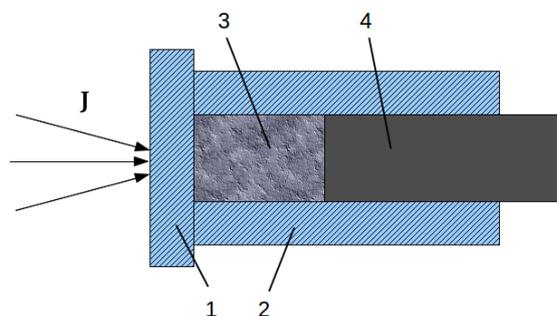


Рис. 1. Схематический вид сборки. 1 – стекло, 2 – корпус (оргстекло), 3 – ВВ, 4 – пуансон

2. Математическая модель

В работе проводится моделирование взрывных сборок в гидродинамическом приближении. Методика численного расчёта основывается на решении уравнений гидродинамики в лагранжевой формулировке по схеме [3], в которой учёт воздействия лазерного излучения на вещество описывалось моделью из работы [1]. Учёт процессов компактирования и разложения ВВ обеспечивается вводом в систему соответствующих уравнений. Ранее в [1] проводилось численное моделирование экспериментальных данных с использованием кинетики объёмного горения [3] для пористого ТЭНа. Результаты расчётов не позволили полностью описать поведение пористого ВВ, в следствие чего, модель объёмного горения ВВ была заменена на кинетику, предложенную в работе [4], которая позволяет, в своих рамках, описывать поведение ТЭНа различной пористости:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} = H(P - P)k\left(\frac{P}{P_{cj}}\right)^\mu (1 - \alpha)^\nu,$$

$$k(\varphi_0) = d_1 \exp(a_1 \varphi_0^2 - b_1 \varphi_0 + c_1),$$

$$\mu(\varphi_0) = a_2 \varphi_0^2 - b_2 \varphi_0 + c_2,$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = k_\varphi (P - P_0 - P_h) \left[1 - \sqrt{\frac{\varphi_0 (1 - \varphi)}{\varphi (1 - \varphi_0)}} \right],$$

где α – массовая доля ВВ; H – функция Хевисайда; P_{ign} – пороговое давление; P_{cj} – давление в точке Чепмана – Жуге; k, μ – константы, зависящие от начальной пористости [4]; $a_1, b_1, c_1, a_2, b_2, c_2$ – подгоночные константы; φ – текущая пористость ВВ формулировке [4]; φ_0 – начальная пористость ВВ в формулировке [4]; k_φ, P_h – константы.

3. Численный расчёт

Все расчёты проводились в двухмерной осесимметричной постановке на единой лагранжевой сетке (рис. 2). Характерные размеры расчётной области составляют 3×4 мм (400×200 ячеек), что при выбранных условиях соответствует 3×8 мм, т.е. укороченной по длине реальной конструкции [2]. Все границы, за исключением оси симметрии, являются свободными.

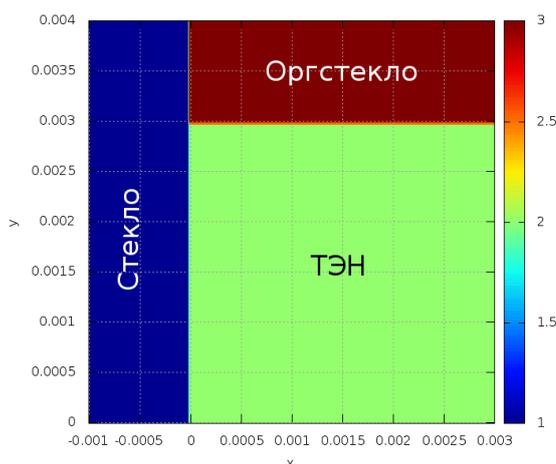


Рис. 2. Область лазерного детонатора, моделируемая (справа) и её характеристики (слева)

Проводилась серия расчётов с варьированием диаметра пучка, мощности падающего излучения, пористости и плотности ВВ. Следующие анимационные файлы показывают результаты численного моделирования лазерного инициирования взрывных сборок:

- 1) P1 – имя анимационного файла для давления в системе при отказе (в Па);
- 2) alp1 – имя анимационного файла для массовой доли в системе при отказе;
- 3) P2 – имя анимационного файла для давления в системе при зажигании (в Па);
- 4) alp2 – имя анимационного файла для массовой доли в системе при зажигании.

3. Результаты

По результатам численного расчёта определялось положение кривой минимальной плотности энергии в зависимости от плотности ВВ или ширины лазерного пучка (рис. 3, а, б).

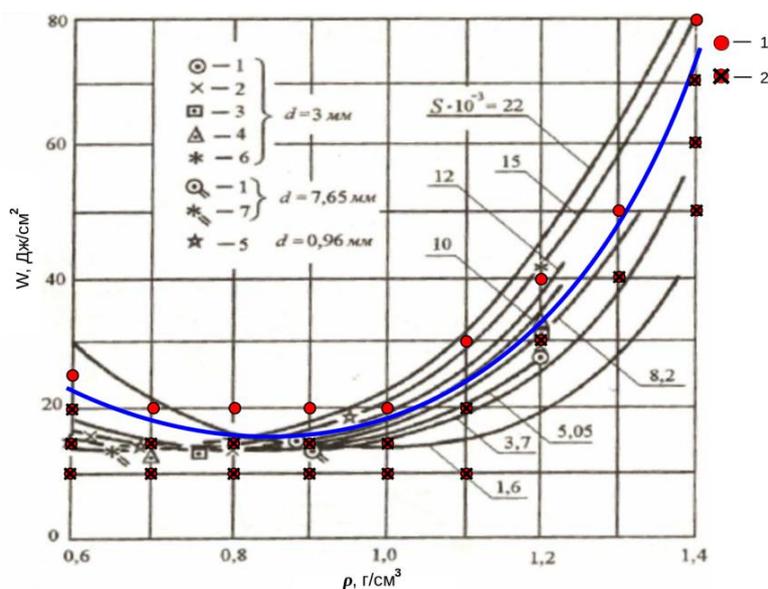


Рис. 3, а. График пороговой плотности энергии падающего излучения в зависимости от плотности ТЭНа. Красные точки – численный расчёт (цельные – произошло зажигание, перечёркнутые – нет). Чёрные линии – эксперимент [2], синяя линия – модельная кривая

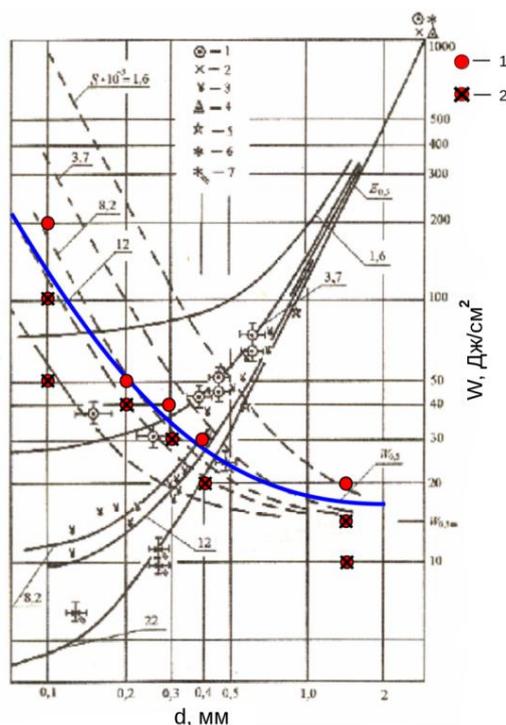


Рис. 3, б. График пороговой плотности энергии падающего излучения в зависимости от диаметра пучка. Красные точки – численный расчёт (цельные – произошло зажигание, перечёркнутые – нет). Чёрные штриховые линии – эксперимент [2], сплошная синяя линия – модельная кривая

Расчётные кривые располагаются в области семейства экспериментальных, однако, модель [4] не включает в себя понятие дисперсности ВВ, что не позволяет точно указать на какой экспериментальной кривой необходимо сопоставлять расчётную. Если учитывать, что калибровка модели Saenz – Stewart проходила в том числе на экспериментах работы [5], где исследовался ТЭН с характерным размером частиц $20 \div 500$ мкм, т.е. величина дисперсности соответствует $\sim 68 \div 1650$ см²/г. Из рис. 2 и 3 кривая располагается в диапазоне дис-

перности $1600 \div 3700 \text{ см}^2/\text{г}$, поэтому результаты численного расчёта представляют только удовлетворительное согласие с выбранными экспериментальными данными.

4. Заключение

Предложенная в работе методика позволяет проводить моделирования воздействия лазерного излучения на взрывные сборки в рамках гидродинамического подхода. В рамках выбранного подхода удалось качественно воспроизвести экспериментальные данные на широком диапазоне плотностей, в сравнении с работой [1]. однако отсутствие в модели явного учёта дисперсности ВВ не позволило получить полную картину эксперимента, что в итоге даёт только удовлетворительное согласие с количественной точки зрения. Для разрешения этой проблемы требуется усложнение модели либо подбором констант в уравнение кинетики и модель компактирования, либо внедрением в модель двухскоростной гидродинамики для раздельного описания ВВ и ПВ, что, несомненно, будет более правильным.

Литература

1. Куратов С.Е., Серёжкин А.А., Чесноков А.А. Физико-математическая модель лазерного детонатора//Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2015. Т.16, вып.1. 9с. <http://chemphys.edu.ru/issues/2015-16-1/articles/316/>
2. Таржанов В.И., Зинченко А.Д., Сдобов В.И. и др. Лазерное инициирование тэна. ФГВ, 1996 г., № 4.
3. Mader C.L. Numerical Modeling of Explosives and Propellants. CRC Press. 2008.
4. Saenz J.A., Stewart D.S. Modeling deflagration-to-detonation transition in granular explosive pentaerythritol tetranitrate. AIP, 104, 043519 (2008).
5. Коротков А.И., Сулимов А.А. и др. О переходе горения пористых ВВ в детонацию. ФГВ, 1969 г., № 3.

Статья поступила в редакцию 20 ноября 2015 г.