

МОДЕЛИРОВАНИЕ СКОЛЬЗЯЩЕЙ ДЕТОНАЦИИ В МЕЛКОДИСПЕРСНОЙ СМЕСИ ВЗРЫВЧАТЫХ И ИНЕРТНЫХ ВЕЩЕСТВ

А.Н. Паршиков, С.А. Медин

*Объединенный институт высоких температур РАН,
Москва, 125412, Ижорская, д. 13, стр. 2*

Аннотация

С помощью метода SPH проведено численное моделирование распространения детонационной волны в насыпных слоях взрывчатого вещества (октоген) и инертной добавки (NaCl). Задача решалась в плоской двумерной постановке. Для конденсированного состояния взрывчатого вещества и продуктов его детонации использовались известные уравнения состояния JWL с константами, взятыми для ВВ нормальной плотности. Разложение ВВ моделировалось с помощью макрокинетического уравнения «ignition and growth», согласованного с уравнениями состояния JWL. Рассчитана скорость детонации в насыпных слоях различной толщины. Определена критическая толщина насыпного слоя. Проведено сопоставление результатов расчета с известными данными экспериментов по детонации смеси гексоген/сода.

NUMERICAL SIMULATION OF SLIDING DETONATION IN THE FINE-GRAINED MIXTURE OF EXPLOSIVE AND INERT MATERIAL

A.N. Parshikov, S.A. Medin

Joint institute for high temperatures of RAS, Russia, Moscow, 125412

Computer simulation of the detonation wave propagating in the bulk layers of the explosive (HMX) and inert admixture (NaCl) is performed by means of SPH method. The problem was solved for the plane two-dimensional formulation. The standard JWL equations of state for unreacted explosive and detonation products, the constants of whose were taken for the normal density, were used. The explosive burn was described by the macrokinetic reactor rate equation “ignition and growth” consistent with the JWL equations of state. Velocity of detonation in the bulk layers of different thicknesses is calculated. The critical thickness of the bulk layer is determined. The comparison of the results of computation with the known experimental data on RDX/soda mixture detonation is performed.

1. ВВЕДЕНИЕ

Исследования скользящей детонации обусловлены развитием и совершенствованием взрывных технологий уплотнения и упрочнения материалов, штамповки и сварки взрывом. На начальных этапах исследований решались задачи метания пластин слоем взрывчатого вещества. При построении теоретических моделей основное внимание уделялось описанию течения продуктов детонации и расчету распределения давления на поверхности метаемой пластины. Первыми примерами расчёта двумерного течения продуктов взрыва за скользящей детонационной волной в стационарной постановке на основе простых моделей можно считать [1] и [2]. Для описания расширения продуктов детонации использовались соотношения Прандтля – Майера. Были получены соотношения для угла разлёта и кривизны границы расширяющихся продуктов детонации. В такой же постановке задача о течении ПД при скользящей детонации решена аналитически в [3]. Для построения численных решений применялся метод характеристик [4].

Одно из важных направлений современного развития взрывных технологий связано с использованием новых типов низкоплотных ВВ, листовых [5] или насыпных [6]. За счет вариации соотношения долей инертного материала и ВВ, а также дисперсности гранул и толщины слоя, в широких пределах контролируется скорость детонационной волны.

Для численного моделирования детонации гетерогенных ВВ разработаны многоскоростные (многожидкостные) модели [7–9]. Для описания разложения реагирующей компоненты в этих моделях необходимо задание глобального закона химической реакции горения дисперсной частицы.

В отличие от континуальных моделей гетерогенных реагирующих течений при мезомеханическом описании достаточно знать локальное макрокинетическое уравнение для индивидуального ВВ. При этом разложение мезочастицы ВВ происходит локально в каждой точке в соответствии с внутренними распределениями термодинамических параметров и массовых долей реагента и продуктов реакции. Важным преимуществом такого подхода является возможность описания механизмов образования горячих пятен и установление их влияния на распространение детонационных волн. Моделирование гетерогенных ВВ на мезомасштабном уровне осуществлено в [10-11].

В данной работе постановка задачи по моделированию скользящей детонации формулируется для условий, близких к экспериментам, выполненным в РФЯЦ ВНИИЭФ и ИСМАН [6]. В экспериментах измерялась скорость детонационной волны в слоях порошкообразной смеси гексоген/сода при массовой доле 35/65 и плотности смеси около 0.93 г/см^3 для различных значений толщины слоя. Схема эксперимента показана на рис. 1. Приготовленная смесь размещалась в картонной коробке на толстой металлической плите.

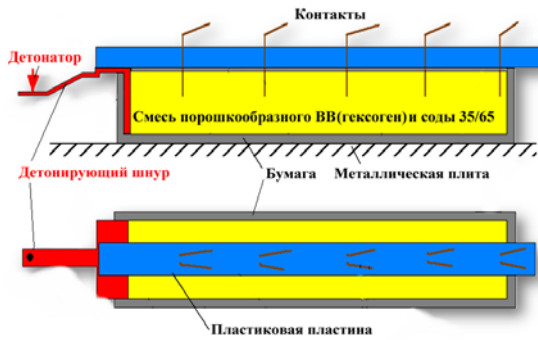


Рис.1. Схема эксперимента [6] по измерению скорости детонационной волны контактным способом

После подрыва детонатора на некотором расстоянии от точки подрыва формировалась детонационная волна и в процессе её перемещения по смеси замыкались электрические контакты. По известному расстоянию между контактами и измеренным моментам времени замыкания определялась скорость детонационной волны.

В отличие от условий эксперимента авторы предлагаемой работы производили численное моделирование для смеси октогена и соли (хлорида натрия) для тех же самых массовых долей компонентов и средней плотности среды. При этом решалась плоская двумерная задача о движении детонационной волны в смеси гранул ВВ и гранул NaCl. При численном моделировании инициирование детонации осуществляется коротким ударом по левой границе ВВ пластиной из вольфрама со скоростью 2500м/с.

2. ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА ДЕТОНАЦИИ

Течение среды описывается уравнениями сохранения массы, импульса и энергии:

$$\frac{d\rho}{dt} = -\rho \nabla \vec{U}, \quad (1)$$

$$\rho \frac{d\vec{U}}{dt} = -\nabla \cdot P, \quad (2)$$

$$\rho \frac{d}{dt} \left(E + \frac{1}{2} U^2 \right) = -\nabla \cdot (\vec{U} \cdot P). \quad (3)$$

СПН-аппроксимация уравнений (1)–(3) изложена в [12–13]. Уравнения СПН решаются по явной разностной схеме. Система (1)–(3) для реагирующей компоненты (октоген) замыкается уравнением состояния JWL [14]. Для непрореагировавшего ВВ и продуктов детонации имеем калорические уравнения состояния:

$$\frac{E_s}{v_{s0}} = \frac{P_s \tilde{v}_s}{\omega_s} - F_s(\tilde{v}_s) + F_s(1), \quad (4)$$

$$\frac{E_g}{v_{s0}} = \frac{P_g \tilde{v}_g}{\omega_g} - F_g(\tilde{v}_g) - Q \quad (5)$$

и термические уравнения состояния

$$P_s = \omega_s \tilde{v}_s \left[C_s T_s + G_s(\tilde{v}_s) + F_s(\tilde{v}_s) \right], \quad (6)$$

$$P_g = \omega_g \tilde{v}_g \left[C_g T_g + G_g(\tilde{v}_g) + F_g(\tilde{v}_g) \right]. \quad (7)$$

В уравнениях (4)–(7) введены следующие функции:

$$F_i(\tilde{v}_i) = A_i \left(\frac{\tilde{v}_i - 1}{\omega_i R_{1i}} \right) e^{-R_{1i} \tilde{v}_i} + B_i \left(\frac{\tilde{v}_i - 1}{\omega_i R_{2i}} \right) e^{-R_{2i} \tilde{v}_i},$$

$$G_i(\tilde{v}_i) = \frac{A_i}{R_{1i}} e^{-R_{1i} \tilde{v}_i} + \frac{B_i}{R_{2i}} e^{-R_{2i} \tilde{v}_i},$$

где $\tilde{v}_i = v_i/v_{s0}$, $i=s,g$.

Нижний индекс принимает значения $i=s,g$ для конденсированной и газообразной фазы соответственно. Для удельного объема смеси и внутренней энергии используются аддитивные соотношения

$$v = (1 - \lambda)v_s + \lambda v_g, \quad (8)$$

$$E = (1 - \lambda)E_s + \lambda E_g. \quad (9)$$

Для конденсированной и газообразной фаз выполняются условия термодинамического равновесия:

$$P_s = P_g = P, \quad (10)$$

$$T_s = T_g = T. \quad (11)$$

При задании λ, v, E неизвестными величинами в уравнениях (4)–(11) являются:

$$v_s, v_g, T_s, T_g, P_s, P_g, E_s, E_g.$$

В таблице 1 даны константы уравнения JWL для октогена.

Таблица 1

Константы УРС JWL для октогена [14]

Параметр	Продукты детонации, индекс (g)	Непрореагировавшее ВВ, индекс (s)
ρ_{s0} , кг/м ³	–	1842
C_s , МПа/К	1.0	2.505
Q , ГПа	10.2	–
A , ГПа	852.4	6969
B , ГПа	18.02	-172.7
R_1	4.6	7.8
R_2	1.3	3.9
ω	0.38	0.8578

Макрокинетическое уравнение для массовой доли ВВ λ также заимствовано из [14]:

$$\frac{d\lambda}{dt} = -I(1-\lambda)^{2/9} \left(\frac{v_{0s} - 1}{v_s} \right)^4 - J(1-\lambda)^{2/9} \lambda^{2/3} P^Z, \quad (12)$$

с константами для октогена $I=44$ мкс⁻¹, $Z=1.6$, $J=200$ мкс⁻¹ Мбар^{-Z}.

Уравнение состояния для инертных включений также принимается в форме Ми – Грюнайзена:

$$P - P_r = \Gamma \rho (E - E_r), \quad (13)$$

здесь $P_r(\rho)$ и $E_r(\rho)$ – опорные кривые.

Для инертных включений опорными кривыми являются ударные адиабаты при плотности выше начальной и упругие кривые при плотности ниже начальной

$$P_r = \begin{cases} P_H, & \rho > \rho_{in0} \\ P_c, & \rho \leq \rho_{in0} \end{cases}, E_r = \begin{cases} E_H, & \rho > \rho_{in0} \\ E_c, & \rho \leq \rho_{in0} \end{cases}, \quad (14)$$

где

$$P_H = C_a^2 (v_{in0} - v) / [v_{in0} - S_a (v_{in0} - v)]^2, \\ E_H = P_H (v_{in0} - v) / 2, \quad P_c = K (v_{in0} - v) / v_{in0}, \\ E_c = P_c (v_{in0} - v) / 2, \quad v = 1 / \rho. \quad (15)$$

Значения констант уравнения состояния в форме Ми – Грюнайзена для NaCl приведены в табл. 2.

Таблица 2

Константы УРС Ми – Грюнайзена для инертной добавки (NaCl) [16]

Параметр	Величина
ρ_{in0} , кг/м ³	2165
K , Н/м ²	2.64e+10
C_a , м/с	3315
S_a	1.456

Применяемый метод SPH (12)–(13) построен на основе решения задачи о распаде разрыва. В методе применяется безытерационная процедура вычисления «распадных» значений давления и скорости [15], использующая уравнение состояния Ми – Грюнайзена для вещества по обе стороны разрыва. Для октогена авторы принимали значения $C_a = 3070$ м/с и $S_a = 1.79$ согласно [16].

3. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ О СКОЛЬЗЯЩЕЙ ДЕТОНАЦИИ В НАСЫПНОЙ СМЕСИ ВВ И ИНЕРТНОЙ ДОБАВКИ

При численном моделировании процесса детонации смеси октоген/NaCl выделяется расчетная область, в которой располагаются SPH-частицы, содержащие октоген или NaCl. Верхняя граница области полагается свободной, нижняя граница является жесткой стенкой. Расчетная область представляется в виде периодического повторения квадратной подобласти, называемой шаблоном (рис.2). Шаблон в свою очередь разбивается на пространственные ячейки, каждая из которых заполняется (полностью или частично) SPH-частицами. При частичном заполнении ячеек поры в смеси формируются естественным образом как пустые подобласти, в которых SPH-частицы отсутствуют. Форму и количество пор, а также форму и количество гранул компонент необходимо задавать на этапе подготовки шаблона, исходя из представлений о мезоструктуре смеси. Алгоритм заполнения расчетной области SPH-частицами в описанном подходе сводится к периодическому повторению шаблона вдоль каждой из координат.

В расчетах использовались два варианта шаблонов при формировании исходной геометрии расчетной области. Первый вариант шаблона представляет собой подобласть пространства из 10×10 квадратных ячеек (рис.2), в каждой из которых размещается одна SPH-частица, соответствующая ВВ или NaCl (либо ячейка остаётся пустой и соответствует вакууму). Геометрические размеры SPH-частицы, содержащей ВВ или NaCl, равны геометрическим размерам ячейки. Такой шаблон будем называть «микрошаблоном» и расчетная область содержит, таким образом, 45×5 = 225 микрошаблонов.



Рис.2. Расчетная область ($t=0$) при использовании микрошаблона, задающего мезоструктуру смеси из 18 SPH-частиц октогена и 28 SPH-частиц NaCl (d – размер ячейки шаблона)

Второй вариант шаблона также представляет собой подобласть из 10×10 пространственных ячеек (рис.3), но в каждой из пространственных ячеек может размещаться до 25 SPH-частиц.

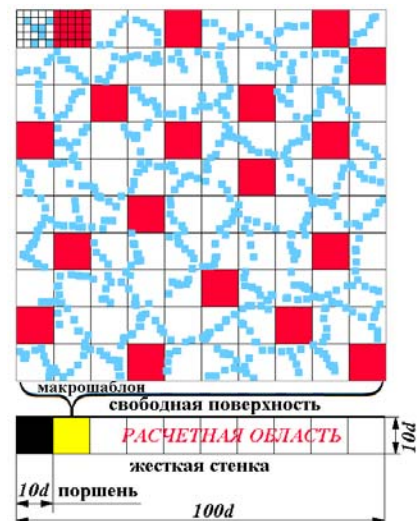


Рис.3. Расчетная область ($t=0$) при использовании макрошаблона, задающего мезоструктуру смеси из 450 SPH-частиц октогена и 700 SPH-частиц NaCl (d – размер ячейки шаблона)

В ячейке с ВВ содержится именно 25 SPH-частиц, остальные ячейки соответствует вакууму. SPH-частицы с NaCl распределены в вакуумных ячейках произвольным образом, но так, чтобы общее число их в шаблоне соответствовало количеству SPH-частиц с NaCl в микрошаблоне. В этом случае массовое содержание компонент в обоих шаблонах неизменно и второй шаблон назовём «макрошаблоном». Расчетная область содержит в этом случае 9 макрошаблонов (рис.3).

Как в случае микрошаблона, так и в случае макрошаблона, все SPH-частицы (как содержащие ВВ, так и содержащие NaCl) имеют одинаковые размеры. Если микрошаблон описывает смесь ВВ и NaCl, в которой гранулы обеих компонент смеси имеют близкие размеры, то макрошаблон описывает смесь из крупных гранул ВВ, размещённых в инертной фазе более мелкой дисперсности. Целью использования двух различных шаблонов при моделировании детонации смеси являлось выяснить влияние размера частиц инертной фазы на скорость передачи детонации.

При начале расчета пластина-ударник имеет заданную скорость 2500 м/с. Через некоторое время t^* после удара (обычно в расчете t^* принималось 0.15 мкс) всем SPH-частицам пластины-ударника приписывается скорость, равная нулю. Таким образом, металлический поршень инициирует детонацию и останавливается в момент t^* . На рис.2 толщина пластины-ударника равняется $50d$. Детонационная волна распространяется вправо.

4. МОДЕЛИРОВАНИЕ СКОльзяЩЕЙ ДЕТОНАЦИИ В НАСЫПНОЙ СМЕСИ ВВ И ИНЕРТНОЙ ДОБАВКИ

Была проведена серия расчетов скорости детонации в слоях тех же толщин H , что использовались в экспериментах [6]. На рис. 4 показано распространение детонационной волны в смеси ВВ (октоген) с инертной добавкой (NaCl) толщиной $H = 3$ мм.

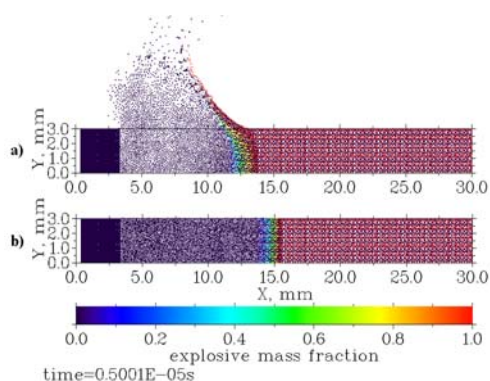


Рис.4. Детонационная волна в смеси взрывчатого вещества (октоген) с инертной добавкой (NaCl) при начальной плотности смеси $\rho_0 = 0.93$ г/см³ в случае свободной верхней границы (a) и в случае жесткой стенки сверху (b) на момент времени $t = 5$ мкс

Для объяснения причины снижения скорости детонации в слоях с толщиной близкой к критической на рис.4 показаны два расчёта, различающиеся только

отсутствием или наличием верхней жесткой стенки (рис.4a и рис.4b соответственно).

Ширина зоны горения рассчитывается с использованием макрокинетического уравнения (12), составляет ≈ 2 мм и близка к толщине детонирующего слоя смеси. При боковом истечении ПД боковая волна разрежения проникает в зону реакции и величина давления в зоне реакции падает. Второй член в правой части (12) зависит от давления и приводит к меньшей скорости горения ВВ и, соответственно, к меньшей скорости детонации по сравнению с детонацией слоя, который ограничен сверху жесткой стенкой, препятствующей боковому истечению ПД.

На рис. 5 a,b представлены картины скользящей и нормальной детонации в смеси для момента времени 11.4 мкс. Можно видеть, что в смеси с $H = 3$ мм скорость скользящей детонации ниже, чем скорость нормальной детонации. Модель (4)–(12), основанная на уравнении состояния JWL и макрокинетическом уравнении горения ВВ позволяет находить критические толщины ВВ непосредственно из вычислительного эксперимента.

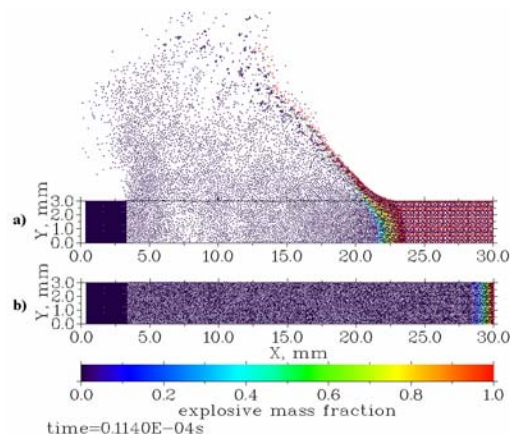


Рис. 5. Детонационная волна в смеси взрывчатого вещества (октоген) с инертной добавкой (NaCl) при начальной плотности смеси $\rho_0 = 0.93$ г/м³ в случае свободной верхней границы (a) и в случае жесткой стенки сверху (b) на момент времени $t = 11.4$ мкс

Структура течения при детонации смеси ВВ и инертного материала наглядно иллюстрируется эпюрами плотности каждой из компонент (рис.6). В невозмущённой области плотности частиц ВВ и частиц NaCl равны их начальным плотностям ρ_{0s} и ρ_{in0} соответственно.

Ударная волна компактирует гранулированную смесь в монолитную среду и затем сжимает каждую из компонент среды до нового значения плотности. В рассмотренной смеси процесс компактирования и последующего сжатия происходит в узкой зоне протяженностью ~ 0.3 мм (рис.6). Адиабатический разогрев при сжатии смеси запускает химическую реакцию горения ВВ, которое описывается уравнением (12) и первый член в правой части уравнения ответствен за старт горения. Протяженность зоны горения для данной смеси составляет ~ 2 мм, как видно по изменению параметра λ .

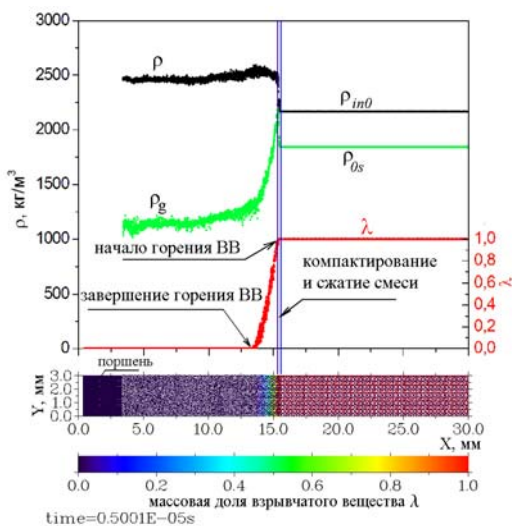


Рис. 6. Структура нормальной детонационной волны в смеси взрывчатого вещества (октоген) с инертной добавкой (NaCl) при начальной плотности смеси $\rho_0 = 0.93 \text{ г/см}^3$

5. СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ С ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ ДАННЫМИ

В работе [6] экспериментально были измерены скорости детонации в смеси ВВ (гексоген) с содой для различных толщин слоя смеси и различных размерах гранул ВВ, входящих в смесь. В эксперименте использовались порошки гексогена с размером частиц $1\div 3 \text{ мкм}$ и с размером частиц $\approx 70 \text{ мкм}$. Первый случай достаточно сложен для численного моделирования на уровне мезомасштаба, так как требует чрезмерных вычислительных затрат. Минимальный размер SPH-частицы при моделировании полагался 40 мкм .

Расчеты детонации мелкодисперсного ВВ проводились с использованием микрошаблона для описания мезоструктуры смеси. Результаты численного моделирования мелкодисперсной смеси близки к данным эксперимента (рис.7). Достаточно точно определена критическая толщина слоя смеси ($\approx 2 \text{ мм}$) и ход изменения скорости детонации в зависимости от роста толщины слоя H .

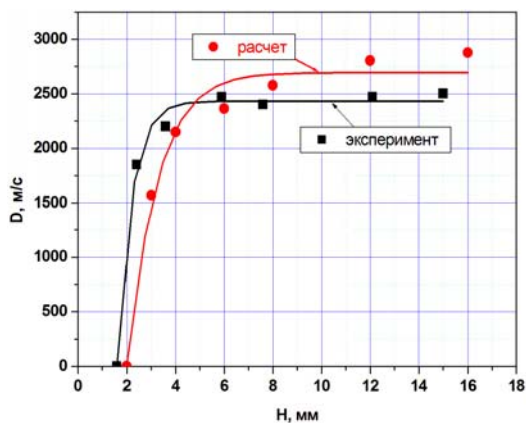


Рис. 7. Скорость детонации в смеси ВВ (октоген) и инертной добавки (NaCl) в зависимости от толщины слоя смеси H ; ● – расчет с использованием микрошаблона (при размере частиц ВВ $40\div 320 \text{ мкм}$), ■ – эксперимент (смесь гексоген/сода при размерах частиц ВВ $1\div 3 \text{ мкм}$)

Достаточно интересный результат получен при моделировании детонации крупнодисперсной смеси. В этом случае для описания мезоструктуры смеси использовались два шаблона: микрошаблон и макрошаблон. В первом случае в каждой ячейке микрошаблона располагалась одна SPH-частица каждой компоненты. Во втором случае инертная компонента заполняла ячейку частично (см. рис.3). На рис.8 показаны результаты моделирования для обоих случаев. Расчеты, в которых инертная компонента являлась мелкодисперсной, хорошо следуют результатам экспериментов (в экспериментах инертная компонента была мелкодисперсной).

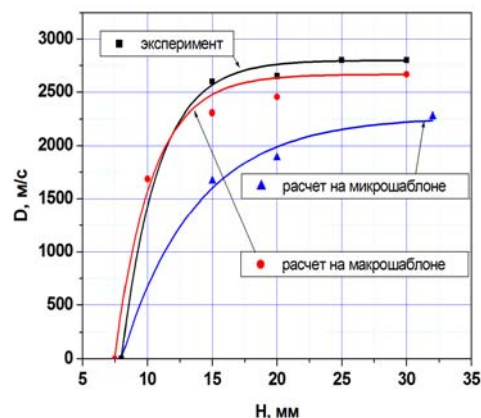


Рис. 8. Скорость детонации смеси ВВ (октоген) и инертной добавки (NaCl) в зависимости от толщины слоя смеси H ; ● – расчет с использованием макрошаблона (при размере частиц ВВ $150\div 400 \text{ мкм}$ и размере частиц NaCl 40 мкм), ▲ – расчет с использованием микрошаблона (при размере частиц ВВ $150\div 400 \text{ мкм}$ и размере частиц NaCl $150\div 400 \text{ мкм}$), ■ – эксперимент (смесь гексоген/сода при размерах частиц ВВ 70 мкм)

В то же время расчеты с крупнодисперсной инертной фазой предсказывают значительное уменьшение скорости детонации в слоях тех же толщин, хотя критическая толщина детонирующей смеси практически не изменилась. Объяснение подобного результата требует анализа гидродинамических процессов на уровне мезомасштаба смеси и будет осуществлено в будущем. Представляет также интерес осуществить серию соответствующих экспериментов для проверки правильности прогноза (показанного на рис.8 как расчет на микрошаблоне).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Решена задача о моделировании распространения скользящих детонационных волн в насыпных смесях ВВ/инертный материал. Получены данные о критической высоте слоя смеси H и зависимости скорости детонационной волны от H . Установлено, что помимо размера частиц ВВ на скорость детонации существенную роль оказывают размеры частиц инертной фазы. Проведено сопоставление результатов расчетов и эксперимента.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

ВВ – взрывчатое вещество;
 ПД – продукты детонации;

Нижний индекс: $i=s$ (ВВ), g (ПД);

$A_i, B_i, R_{1i}, R_{2i}, \omega_i$ – набор эмпирических констант для уравнения состояния JWЛ;

C – теплоемкость вещества, Па/К;

ρ – плотность вещества, кг/м³;

P – давление, Па;

v – удельный объем, м³/кг;

U – массовая скорость, м/с;

T – температура, К;

K – изотермический модуль объемного сжатия, Па;

Γ – коэффициент Грюнайзена;

E – внутренняя энергия, Дж/кг;

D – скорость детонации ВВ, м/с;

λ – массовая доля ВВ;

Q – теплота взрыва, Па (Дж/м³).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. G.I.Taylor, Blast impulse and fragment velocities from cases // *Scientific Papers of G.I.Taylor* / v.III, No 40, Cambridge Univ. Press, 1963, P.363-369.
2. S.Abarbanel, The deflection of confining walls by explosive loads // *Isr. Journal Technology*, v.4, No 1, 1966, P.77-81.
3. Станюкович К.П. Неустановившееся движение сплошной среды, М.: Наука, 1971, 856 с.
4. N.E.Hoskin, J.W.S. Allan et al, The Motion of Plates and Cylinders Driven by Detonation Waves at Tangential Incidence // *Proceedings of the IVth Symposium on Detonation*, Oct. 12-15, USA, 1965, P. 14-26.
5. В.К. Голубев, В.А. Медведкин, О нагружении преград взрывом низкоплотного листового взрывчатого вещества // *Прикладная механика и техническая физика*, Т.41, №3, 2000, С.43-47.
6. L.A. Andreevskikh, A.A. Deribas, O.B. Drennov, A.L. Mikhailov, N.N. Titova, Mixed Explosives for Explosive Welding of Thin Materials / X International Symposium on EPNM-2010, Sep. 7-11, Bechichi, Montenegro, 2010.
7. J. B. Bdzil, R. Menikoff, S. F. Son, A. K. Kapila, D. S. Stewart, Two-phase modeling of deflagration-to- detonation transition in granular materials: A critical examination of modeling issues // *Phys. Fluids*. v.11, No 2. 1999. P.378-402.
8. K.A. Gonthier and J.M. Powers, A High-Resolution Numerical Method for a Two-Phase Model of Deflagration-to-Detonation Transition / *J. Comput. Phys.* **163**, 2000, P. 376.
9. Ю.В. Кратова, А.В. Федоров, В.М. Фомин, Т.А.Хмель, Режимы распространения плоской детонации в газозвездах в каналах с разрывом сечения // *Физико-химическая кинетика в газовой динамике*, Т.9, 2010, www.chemphys.edu.ru/pdf/2010-01-12-005.pdf
10. M.R. Baer, Computational modeling of heterogeneous reactive materials at the mesoscale// *Shock Compression of Condensed Matter-1999* / Ed. by M.D. Furnish, L.C. Chhabildas and R.S. Hixson, AIP, 2000, P. 27-33.
11. С.А. Медин, А.Н. Паршиков, Моделирование мезоструктуры течения при распространении детонации в гетерогенных ВВ // *Физико-химическая кинетика в газовой динамике*, Т.9, 2010, <http://www.chemphys.edu.ru/pdf/2010-01-12-008.pdf>
12. A.N. Parshikov, S.A. Medin, I.I. Loukashenko, V.A.Milekhin, Improvements in SPH Method by means of Interparticle Contact Algorithm and Analysis of Perforation Tests at Moderate Projectile Velocities // *Int. J. Impact Eng.* **24**, 2000, P.779.
13. A.N. Parshikov, S.A. Medin, Smoothed Particle Hydrodynamics Using Interparticle Contact Algorithms // *J. Comput. Phys.* **180**, 2002, P. 358.
14. E.L. Lee and C.M. Tarver, Phenomenological model of shock initiation in heterogeneous explosives // *Phys. Fluids*, v.23, No. 12, 1980, P.2362.
15. J.K. Ducowicz, A General, Non-Iterative Riemann Solver for Godunov's Method // *J. Comput. Phys.* **61**, 1985, P. 119.

16. Физика взрыва // Под ред. Л.П. Орленко / Т.2. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. – 656 с