

многопроцессорных ЭВМ с распределенной памятью// Вопросы атомной науки и техники, сер. Математическое моделирование физических процессов, 2004г., в. 4, с. 41-50.

11. Евстигнеев А.А., Жерноклетов М.В., Зубарев В.Н. Изэнтропическое расширение и уравнение состояния продуктов взрыва тротила // ФГВ, 1976, № 5, с. 758-763

КИНЕТИКА ВОЗБУЖДЕНИЯ ДЕТОНАЦИИ ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ВВ

В.В. Змушко, Ч.О. Токтохоев, Б.Н. Шамраев

РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, Россия

Для численного моделирования высокочувствительных гетерогенных ВВ используют различные кинетики: Ignition and Growth (IG) [1], SURF [2,3], МК [4] и многие другие. В работе [5] показан ряд преимуществ кинетики SURF по сравнению с кинетикой IG, в частности, более качественное описание стадии возбуждения детонации.

В методике МИМОЗА [6] был реализован вариант кинетики SURF для расчета детонации высокочувствительных ВВ на основе октогена типа PBX-9501. В кинетике SURF используется модель горячих пятен (ГП) в предположении, что сферические ГП имеют одинаковый радиус R и их количество велико. Вводится безразмерная величина s , как отношение радиуса ГП к среднему расстоянию между ними:

$$s = R/d \quad (1)$$

Массовая доля продуктов взрыва (ПВ) в общем случае определяется соотношением:

$$w = 1 - \exp(-s^n) \quad (2)$$

В работе [5] рекомендуется использовать степень $n = 2$. Скорость горения массовой доли ПВ можно записать в виде:

$$\frac{dw}{dt}_{SURF} = \frac{dw}{ds} \frac{ds}{dt} = F(P_S) \frac{dw}{ds} \quad (3)$$

Скорость горения F зависит только от давления P_S , достигнутого на фронте волны:

$$F(P_S) = \begin{cases} 0 & \text{при } P_S \leq P_0, \\ F_1(P_S) & \text{при } P_0 < P_S \leq P_1, \\ F_2(P_S) & \text{при } P_1 < P_S, \end{cases} \quad (4)$$

$$F_0(P_S) = \frac{1}{\tau} \exp(A + B P_S) \quad (5)$$

$$F_1(P_S) = F_0(P_S) - F_0(P_0)[1 + B(P_S - P_0)] \quad (6)$$

$$F_2(P_S) = F_1(P_1) \{1 + C[1 - \exp[-G(P_S - P_1)]]\} \quad (7)$$

Соотношения (4-7) обеспечивают непрерывность функции F в точках P_0 и P_1 , а также, непрерывность производной dF/dP_S в точке P_0 .

Подбор параметров кинетики проводился по данным кривой Пополато [7] в диапазоне давлений от 3 до 7 ГПа, значения параметров представлены в таблице 1.

Таблица 1. Значения параметров кинетики (1–7)

Параметр	Значения	Размерность
τ	1.0	10 мкс
A	1.265232	1
B	0.319779	1/ГПа
P_0	0.1	ГПа
P_1	14.969139	ГПа
C	2.012487	1
G	0.459335	1/ГПа

Проведены тестовые одномерные расчеты по прохождению детонационной волной (ДВ) больших расстояний (более 3 см ВВ) в плоском и сферическом случаях. При моделировании детонации на сетках с размером ячеек ~ 0.01 см и использованием интерполяционной модели смеси уравнений состояния ВВ и ПВ, проявились дефекты в профилях давления за фронтом ДВ. В случае плоской волны проявилась так называемая “полочка” при давлении 32 ГПа, при схождении ДВ к центру – характерная немонотонность (см. рисунок 1). Подобные дефекты были описаны ранее в работах Бондаренко Ю.А. [8,9] для кинетики навязанного энерговыделения с заданной скоростью фронта волны.

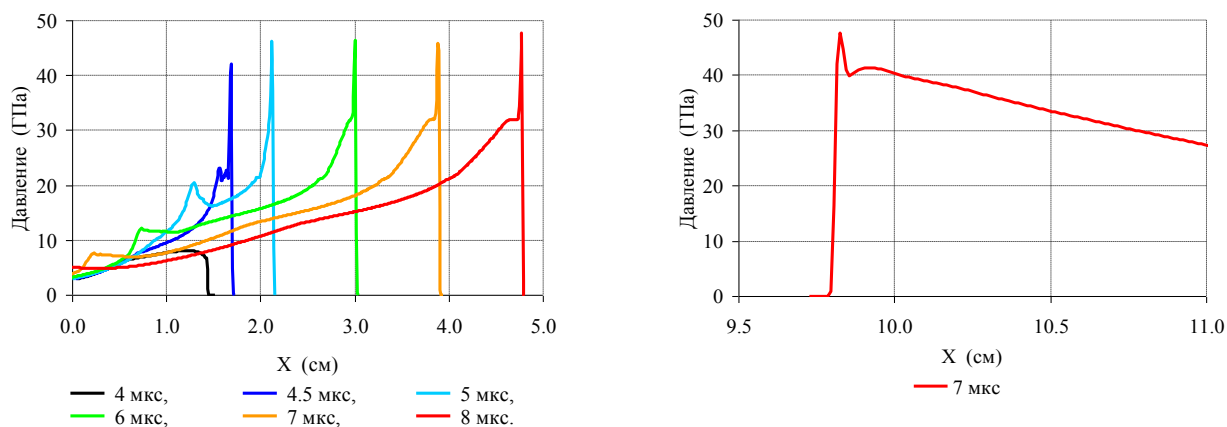


Рисунок 1. Дефекты профилей давления за фронтом ДВ: “полочка” в случае плоской ДВ (слева) и “немонотонность” при схождении ДВ к центру (справа)

Кинетика догорания ВВ за фронтом ДВ

Для устранения дефектов введена кинетика догорания (переход на другую скорость горения) ВВ за фронтом ДВ

$$\frac{dw}{dt}_{KD} = Z w^{1/3} (1-w) \quad (8)$$

где Z – константа. Переход к скорости горения (8) осуществляется при давлениях на фронте волны $P_s \geq P_k$ с помощью дополнительного множителя $\Omega(w)$

$$\frac{dw}{dt}_{SKD} = \Omega \left[\frac{dw}{dt} \right]_{SURF} + (1-\Omega) \left[\frac{dw}{dt} \right]_{KD} \quad (9)$$

вида:

$$\Omega(w) = \begin{cases} 1 & \text{при } w < W_1, \\ \frac{1}{2} \left(1 + \cos \left(\pi \frac{w - W_1}{W_2 - W_1} \right) \right) & \text{при } W_1 \leq w \leq W_2, \\ 0 & \text{при } W_2 < w, \end{cases} \quad (10)$$

значения параметров приведены в таблице 2.

Таблица 2. Значения параметров кинетики догорания ВВ за фронтом ДВ (8–10)

Параметр	Значения	Размерность
P_K	32.0	ГПа
Z	993.14892	1/(10мкс)
W_1	0.51811	1
W_2	0.63701	1

На рисунке 2 представлены профили давления за фронтом ДВ, полученные в расчетах с переходом на кинетику догорания (8–10), демонстрирующие устранение дефектов.

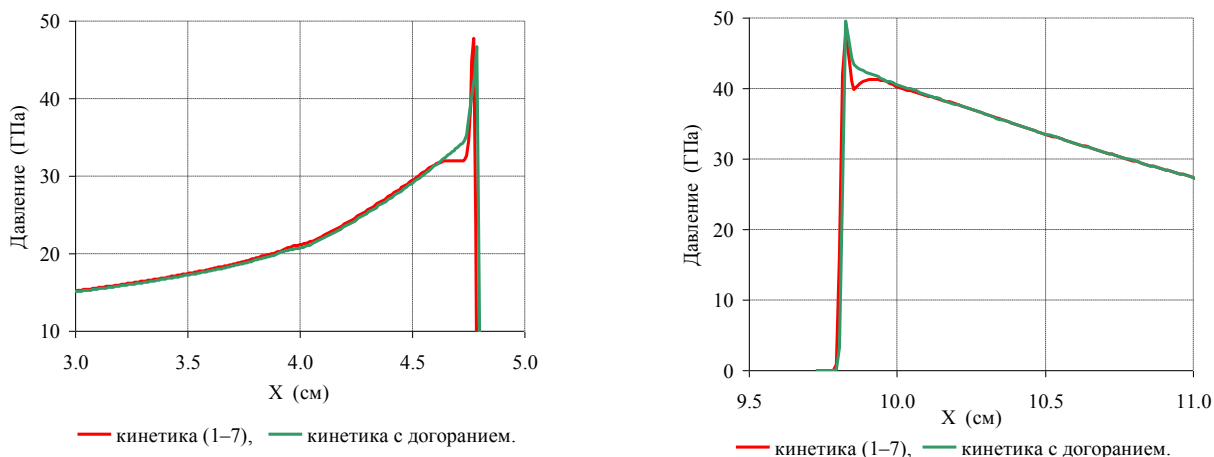


Рисунок 2. Профили давления за фронтом ДВ с кинетикой (1–7) и кинетикой с догоранием (1-10): в случае плоской ДВ (слева) и при схождении ДВ к центру (справа)

Дополнительное объемное горение

В работе Тарвера [10] представлены экспериментальные данные по удару алюминиевой пластиной образца ВВ. Манганиновые датчики, установленные на глубинах 0, 3, 7 и 10 мм, регистрировали приход и давление проходящей волны (см. рисунок 3). Второй датчик показывает увеличение давления примерно через 1 мкс после прихода ударной волны, связанное с приходом волны от зоны интенсивного горения. Для учета этого эффекта предлагается использовать дополнительное “объемное” горение. А именно:

$$\frac{dw}{dt}_{DG} = \left[\frac{dw}{dt} \right]_{SKD} + \left\{ a \left(\frac{P}{P_a} \right)^b [w(1-w)]^{2/3} \right\} \quad (11)$$

значения параметров приведены в таблице 3.

Таблица 3. Значения параметров кинетики с дополнительным “объемным” горением

Параметр	P_k	Z	W_1	W_2	a	Pa	b
Размерность	ГПа	1/(10мкс)	1	1	1/10 мкс	ГПа	1
Значение	32	831.45744	0.41516	0.62489	85.80193	35	1.52149

Качество описания экспериментов (в особенности, времен достижения максимумов) с дополнительным “объемным” горением заметно выше, чем при использовании кинетики (1–7) (см. рисунок 3).

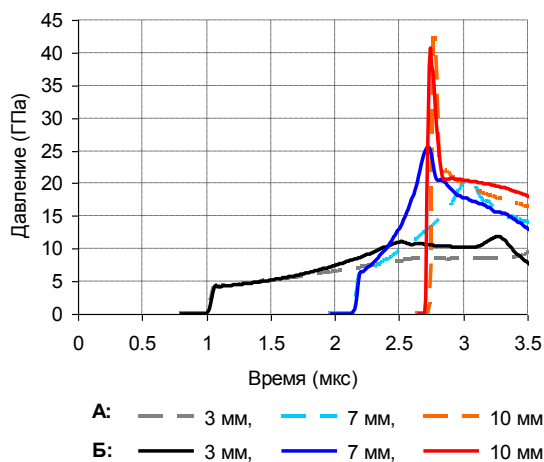
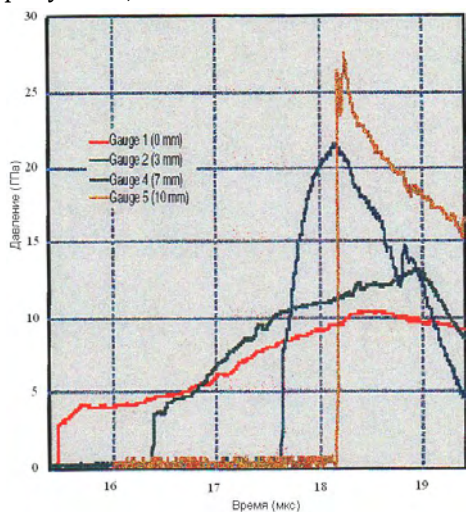


Рисунок 3. Экспериментальные данные Тарвера [10] (слева) и сравнение результатов моделирования кинетикой (1–7) (А) и кинетикой с дополнительным “объемным” горением (1–11) (Б)

Опыты Густавсена

В опытах Густавсена производится удар стальным стержнем по цилиндрам ВВ радиуса 2.54 см различной длины. На расстоянии 0, 3, 7 и 12 мм от оси контактной поверхности регистрируется скорость движения точек поверхности. В отчете LANL [5] представлены результаты моделирования этих опытов с помощью кинетики SURF. Стоит отметить, что стандартная кинетика SURF показывает заниженные значения скорости по сравнению с экспериментом (см. рисунок 4).

Проведено моделирование опытов Густавсена с помощью кинетики, содержащей дополнительное “объемное” горение. Показано хорошее согласие с экспериментом по скоростям и временам достижения максимумов (см. рисунок 5).

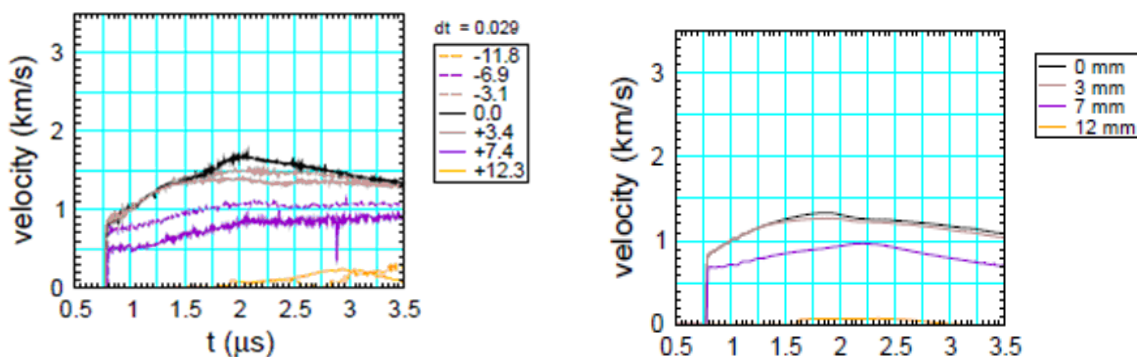


Рисунок 4. Экспериментальные данные Густавсена [5] (слева) и результаты моделирования опыта с помощью кинетики SURF [5] (справа)

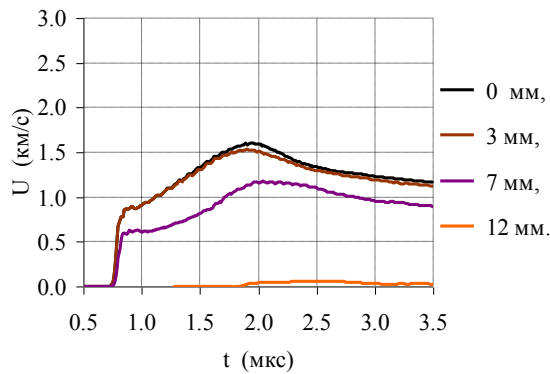


Рисунок 5. Результаты моделирования опыта Густавсена с помощью кинетики с дополнительным “объемным” горением (1-11)

Заключение

Проведены тестовые расчеты по прохождению ДВ больших расстояний с помощью кинетики SURF, реализованной в методике МИМОЗА. При моделировании на грубых сетках с использованием интерполяционной модели смеси проявились характерные дефекты в профилях давления. Кинетика догорания ВВ за фронтом ДВ позволила устранить дефекты и показала монотонное поведение профилей давления.

В кинетику SURF введена модификация с дополнительным “объемным” горением ВВ. Показано более качественное описание опытов Тарвера по ударному инициированию образцов ВВ. Также показано хорошее согласие с экспериментальными данными Густавсена по скоростям и временам достижения максимумов.

Список литературы

1. C.M. Tarver, J.O. Hallquist, L.M. Erickson. Modeling Short Pulse Duration Shock Initiation of Solid Explosives // Eighth Symposium (International) on Detonation, July 15–19, 1985. P. 951–961.
2. M.S. Shaw, R. Menikoff. A Reactive Burn Model for Shock Initiation in a PBX: Scaling and Separability Based on the Hot Spot Concept // 14th International Detonation Symposium, April 11–16, 2010. P. 1487–1496.
3. R. Menikoff, M.S. Shaw, C. Scovel et al. Detonation Waves: models & experiments. Technical report. LANL talk: LA–UR–13–26288, 2013. URL: www.osti.gov/scitech/biblio/1089880-detonation-waves-models-experiments.
4. В.Г. Морозов, И.И. Карпенко, С.Е. Куратов и др. Теоретическое обоснование феноменологической модели ударно-волновой чувствительности гетерогенного ВВ на основе ТАТБ с учетом одно- и двукратного ударно-волнового нагружения, в том числе с промежуточной разгрузкой // Химическая физика. 1995. Т. 14, № 2–3.
5. R. Menikoff. Simulations of Rod Impact: Report LANL: LA–UR–13–27204, 2013. URL: www.osti.gov/scitech/biblio/1093352-simulations-rod-impact-experiments.
6. И.Д. Софронов, Е.А. Афанасьева, О.А. Винокуров и др. Комплекс программ МИМОЗА для решения многомерных задач механики сплошной среды на ЭВМ Эльбрус-2 // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Математическое моделирование физических процессов. 1990. Вып. 2. С. 3-9.
7. R.L. Gustavsen, S.A. Sheffield, R.R. Alcon et al. Shock Initiation of New and Aged PBX 9501 // 12th International Detonation Symposium, August 11–16 th, 2002.

8. Ю.А. Бондаренко. Свойства решений при счете нормальной детонации навязыванием энерговыделения с заданной скоростью фронта // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Математическое моделирование физических процессов. 2009. Вып. 1. С. 3–18.
9. Ю.А. Бондаренко Особенности счета детонации на эйлеровых сетках с навязанной скоростью фронта // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Математическое моделирование физических процессов. 2010. Вып. 3. С. 38–45.
10. C.M. Tarver, J.W. Forbes, F. Garcia et al. Manganin Gauge and Reactive Flow Modeling Study of the Shock Initiation of PBX 9501 // Shock Compressed of Condensed Matter, 2001. URL: www.osti.gov/scitech/biblio/15005431-manganin-gauge-reactive-flow-modeling-study-initiation-pbx.

ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК АЛЮМИНИЯ НА МЕТАТЕЛЬНУЮ СПОСОБНОСТЬ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

М.Н. Махов

Институт химической физики им. Н. Н. Семенова РАН, Москва, Россия

Метательная способность (МС) занимает особое место среди характеристик взрывчатых веществ (ВВ), так как результаты измерений МС позволяют не только определять важный параметр эффективности ВВ, но и изучать процесс расширения продуктов детонации (ПД). Одним из наиболее распространенных методов исследования МС в нашей стране является методика М-40 (аналог М-60 и М-20) [1]. В методе М-40 изучается движение стальной пластины, диаметром 40 мм и толщиной 4 мм, метаемой с торца цилиндрического заряда, высотой и диаметром 40 мм, в канале толстостенной стальной оболочки. Мерой МС служит скорость пластины на расстоянии 40 мм от торца заряда. Данные, рассматриваемые в предлагаемой работе, соответствуют методу М-40.

Результаты исследования МС, приведенные в [2–4], свидетельствуют о том, что в настоящее время дисперсный Al является наиболее перспективным материалом для использования в качестве горючей добавки в составах метательного действия. В последние годы особое внимание исследователей в ИХФ РАН уделялось взрывчатым композициям, содержащим наноразмерный Al (nAl). В частности, определялась МС наноструктурных композитов на основе октогена [5]. Вопреки ожиданиям, оказалось, что нанокompозиты, то есть системы с равномерным распределением частиц nAl в матрице октогена, по МС не обладают преимуществом перед составами, содержащими Al с размером частиц порядка нескольких микрон. Однако вопрос о том, как повлияет на МС переход от механической смеси к нанокompозиту в случае иной взрывчатой основы, например, отличающейся от октогена по кислородному балансу (КБ), подробно не обсуждался. Предлагаемая работа посвящена исследованию зависимости МС алюминийсодержащих взрывчатых смесей от КБ ВВ, концентрации и размера частиц Al (включая nAl). На основе экспериментальных и расчетных данных проанализированы перспективы повышения МС за счет создания алюминизированных нанокompозитов. С целью обобщения материала в работе обсуждаются как новые, так и опубликованные ранее результаты.

Композиции содержали ВВ: 1 – тринитротолуол (ТНТ, –74%), 2 – ТНТ/гексоген = 50/50 (ТГ, –48%, гексоген – циклотриметилентринитрамин), 3 – циклотетраметилентетранитрамин (октоген, –21,6%), 4 – пентаэритриттетранитрат (ТЭН, –10,1%), 5 – тринитроэтиловый эфир тринитромасяной кислоты (ТНЭТБ, –4,1%), 6 – октоген/БТНЭН = 50/50 (ОКБ, –2,6%), 7 – динитрогуанидин (ДНГ, +5,4%), 8 – бис(тринитроэтил)нитрамин (БТНЭН, +16,5%). ВВ расположены в порядке возрастания КБ, значения которого вместе с обозначениями ВВ приведены в скобках. Композиции содержали четыре вида Al, различающиеся размером частиц и активностью (содержанием несвязанного металла). Порошки Al(150), Al(15), Al(7) и Al(0,1) (в скобках указан размер частиц в микронах)