

6. Родионов А.В., Бельский В.М., Богданов Е.Н., Михайлов А.Л., Комиссаров В.В., Седов А.А. // Труды международной конференции «XI Харитоновские тематические научные чтения». Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2009, с. 69-73
7. Rae P.J., Glover B.V., Gunderson J.A., Perry W. Lee // Shock Compression of Condensed Matter, 2011
8. Бельский В.М., Михайлов А.Л., Родионов А.В., Седов А.А. // ФГВ, 2011 г., т. 47, № 6, с. 29-41
9. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. М.: Наука, 1982, 620 с.
10. Гинзбург В.Л. Распространение электромагнитных волн в плазме. М.: НАУКА, 1967, 684 с.

## РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АДИАБАТИЧЕСКОГО РАСШИРЕНИЯ ПВ ВВ НА ОСНОВЕ ТАТБ

*В.Б. Титова, А.А. Балашова, Е.Н. Богданов, Н.А. Володина, М.О. Ширшова, И.А. Тихонова*

РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, Россия

В настоящее время важным аспектом проведения расчетно-экспериментальных исследований взрывчатых веществ является калибровка уравнений состояния продуктов взрыва и кинетики взрывчатых превращений. Для этого проводится выработка таких постановок экспериментов, в которых сочетается наибольшая презентативность полученных экспериментальных результатов, и простота постановки эксперимента, необходимая для проведения численного моделирования.

Одним из широко применяемых направлений исследования взрывчатых веществ является исследование взаимодействия детонирующих взрывчатых составов с инертными преградами (метод «преград» [1]). Одним из вариантов проведения исследований является измерение скорости ударной волны в преграде, контактирующей с ВВ, в зависимости от пройденного расстояния. Если принять за условие, что преграда изготовлена из вещества, ударная адиабата которого известна с высокой точностью, то можно провести оценку профиля давления в детонационной волне на момент выхода к границе с преградой. Поскольку профиль давления в преграде является, фактически, «отпечатком» профиля давления в ДВ, масштабированным за счет различия динамической жесткости и скорости звука в ПВ и преграде.

В таком случае при выборе соответствующего нагружающего устройства и промежуточного инициатора с известными свойствами получаем систему, направленную на калибровку расчетно-теоретических моделей и тестирование уравнения состояния продуктов взрыва. Для взрывчатых веществ с отрицательным кислородным балансом такая система дает возможность оценки влияния дополнительного энерговыделения за фронтом детонационной волны. Хотя вопросу коагуляции избыточного углерода и образованию наноалмазов при взрыве посвящено большое количество работ [2÷7 и др.], более общий вопрос о конденсации углерода за фронтом детонации ВВ с отрицательным кислородным балансом остается дискуссионным до настоящего времени. Ответ на него важен как для понимания физики явления, так и для определения количества энергии, которая выделяется при экзотермической реакции роста углеродных кластеров за пределами зоны химической реакции в детонационной волне.

В первых работах на эту тему в 1987-1991г.г.[2-4], где как раз рассматривался подход с точки зрения растянутого энерговыделения по времени, расчетным путем была показана возможность суммарной добавки примерно в 15% к химической энергии взрыва за времена порядка 0,5мкс для ВВ на основе ТАТБ. В работе [4] было высказано предположение, что процесс синтеза определяется зоной химической реакции. Связью времени образования кластеров с длительностью химической реакции и были обусловлены характерные времена (0,5мкс) и доля по энерговыделению. Дальнейшие исследования [5,6] показали, что процесс точнее описывается в предположении

образования кластеров за пределами зоны химической реакции, т.е. за плоскостью Чепмена-Жуге, которая отделяет зону реакции от газодинамического течения продуктов взрыва. При этом характерные времена и доля растянутого по времени энерговыделения могут быть уже другими. В ряде работ [3] характерное время процессов определяется скоростью диффузии атомов углерода в жидких сжатых ПВ, а это достаточно медленный процесс.

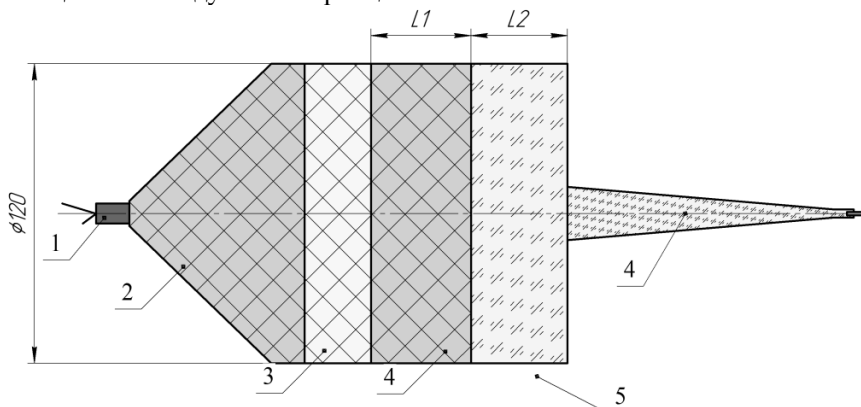
Во ВНИИЭФ в модель кинетики детонации МК [8] включен алгоритм учета медленных реакций, т.е. введена зависимость от времени темпа энерговыделения в стационарном режиме детонации. Алгоритм сознательно упрощен авторами до прояснения сложных вопросов физической природы явления синтеза особенностей и характерных зависимостей. Формула содержит две константы – доля энерговыделения при образовании кластеров от энерговыделения в зоне химической реакции и характерное время процесса. В согласии с работами [3,4] предложена экспоненциальная зависимость по темпу энерговыделения:

$$\Delta Q = kQ(1 - e^{-t-t_0}), \text{ где}$$

$Q$  - калорийность ВВ в УРС;  $t_0$  - момент включения медленных реакций,  $\tau$  - характерное время течения медленных реакций,  $k$  – безразмерный коэффициент, определяющий долю дополнительного энерговыделения.

### Постановка эксперимента

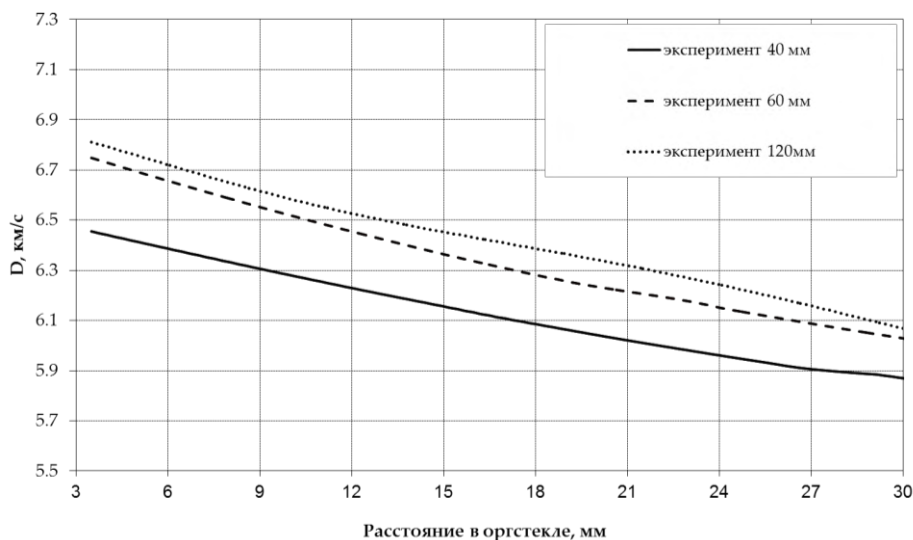
Для тестирования модели в Институте Физики Взрыва проведена серия экспериментов по исследованию распространения ударных волн в преградах из полиметилметакрилата (ПММА). В экспериментах с применением методики непрерывной невозмущающей микроволновой диагностики зарегистрированы зависимости скорости ударной волны от пройденного расстояния для различной толщины исследуемых образцов ВВ на основе ТАТБ.



1 – электродетонатор; 2 – генератор плоской детонационной волны; 3 – промежуточный инициатор; 4 – заряд ВВ на основе ТАТБ; 5 – преграда из ПММА; 6 – излучатель радиоинтерферометра

**Рисунок 1.** Эскиз экспериментальной сборки

Из экспериментальных зависимостей видно, что для слоя толщиной ВВ 40 мм сказывается влияние переходных процессов в исследуемом образце, а для толщин 60 и 120 мм интенсивности затухания волны в оргстекле близки (рисунок 2).



**Рисунок 2.** Экспериментальные зависимости скорости ударной волны в преграде из оргстекла в зависимости от пройденного в оргстекле расстояния

Для расчетно-теоретического анализа полученных экспериментальных данных была проведена серия расчетов по программам комплекса ЛЭГАК [9-10].

В точном соответствии рисунку 1 была построена геометрия расчетов, размеры исследуемых образцов ВВ на основе ТАТБ приведены в таблице 1. Параметры УРС ВВ, примененные в расчетах являются рекомендованными для ВВ на основе ТАТБ [8].

Расчеты проводились в осесимметричной постановке на неподвижной эйлеровой сетке с размером ячейки  $h=0.01$  см. На всех границах задавалось условие свободной поверхности, кроме нижней границы, которая являлась осью симметрии.

Однако в классическом подходе расчетные зависимости не описывают экспериментальных данных. В рамках данной работы рассмотрены следующие возможные механизмы описания совокупности экспериментальных данных:

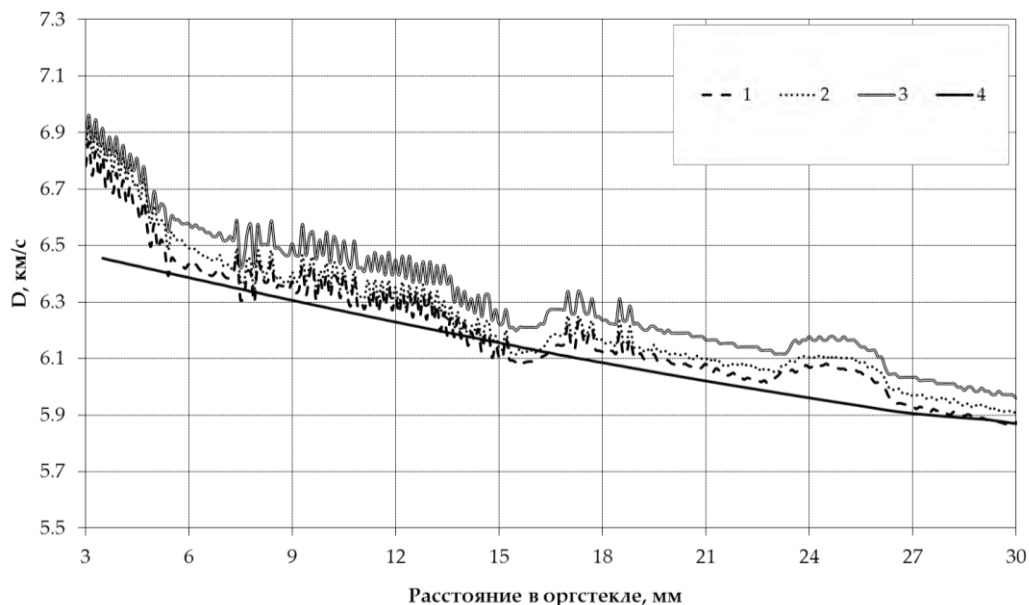
- изменение параметров уравнения состояния ПВ для увеличения значений на опорной изэнтропе относительно экспериментальных;
- применение подхода с учетом кинетики взрывчатых превращений.

В первом случае подобраны константы уравнения состояния для уравнения состояния в форме Зубарева [11], с увеличением итогового энерговыделения на  $\sim 40\%$ .

Во втором подходе расчеты проводились с моделью кинетики МК, и учетом «медленных реакций» за счет коагуляции избыточного углерода (рисунки 3,4,5).

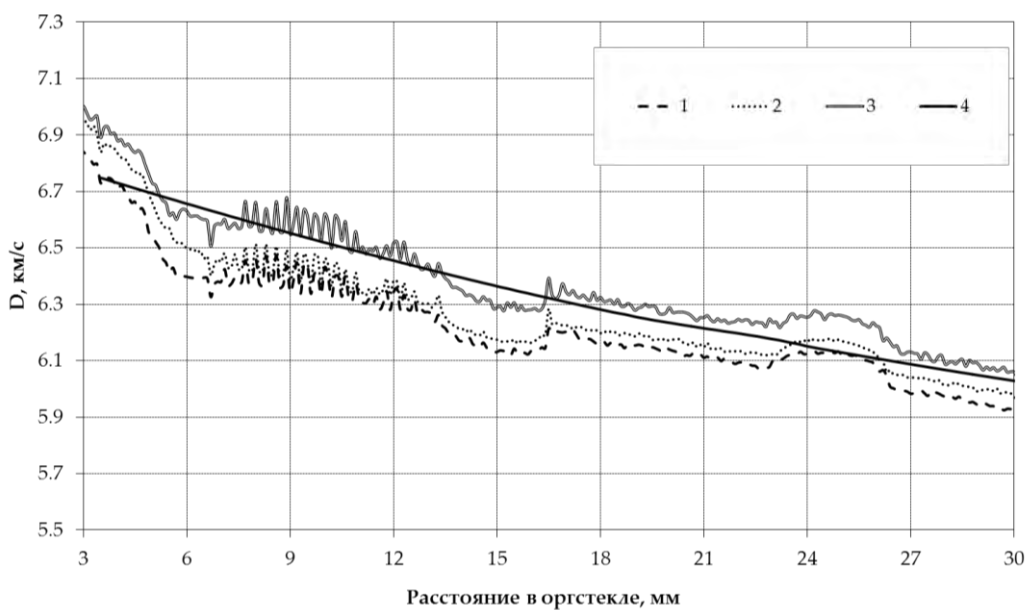
Применение первого из предложенных подходов (рисунки 3,4,5) показало, что изменение параметров уравнения состояния ПВ для увеличения значений на опорной изэнтропе относительно экспериментальных увеличивает расчетные значения скорости ударной волны в оргстекле, но не достаточно. Применение же второго подхода приближает расчетные и экспериментальные зависимости, однако оставляет вопрос о корректировке значений параметров кинетики при переходных процессах (при толщине ВВ 40 мм).

Применение данной серии экспериментов для тестирования уравнений состояния продуктов взрыва и параметров кинетики детонации дает возможность, в той или иной мере, оценить влияние медленных реакций при детонации углеродосодержащих ВВ с отрицательным кислородным балансом. Физика процесса до конца не выяснена. Поэтому проведение экспериментов с хорошим разрешением будет служить не только верификации моделей кинетики детонации, но и пониманию физики явления.



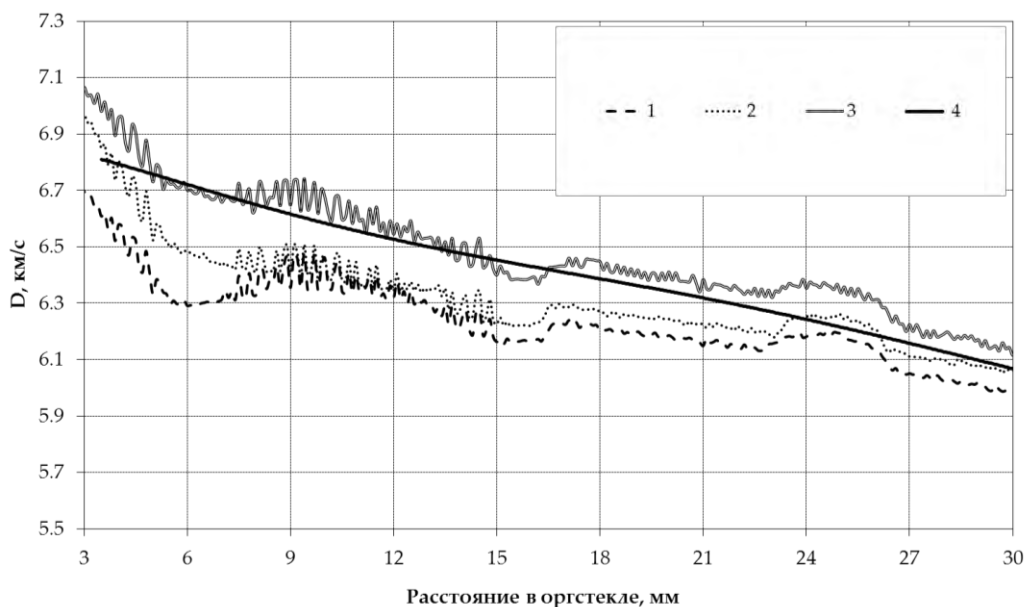
1 – расчет с контролем скорости детонации, 2 – расчет с изменением УРС ПВ,  
3 – расчет с кинетикой МК и учетом «медленных реакций», 4 – эксперимент

**Рисунок 4.** Сравнение расчетных и экспериментальных зависимостей скорости ударной волны в преграде из оргстекла в зависимости от пройденного в оргстекле расстояния для образца из ВВ на основе ТАТБ 40мм



1 – расчет с контролем скорости детонации, 2 – расчет с изменением УРС ПВ,  
3 – расчет с кинетикой МК и учетом «медленных реакций», 4 – эксперимент

**Рисунок 5.** Сравнение расчетных и экспериментальных зависимостей скорости ударной волны в преграде из оргстекла в зависимости от пройденного в оргстекле расстояния для образца из ВВ на основе ТАТБ 60мм



(1 – расчет с контролем скорости детонации, 2 – расчет с изменением УРС ПВ,  
3 – расчет с кинетикой МК и учетом «медленных реакций», 4 – эксперимент

**Рисунок 6.** Сравнение расчетных и экспериментальных зависимостей скорости ударной волны в преграде из оргстекла в зависимости от пройденного в оргстекле расстояния для образца из ВВ на основе ТАТБ 120мм

### Список литературы

1. Невозмущающие методы диагностики быстротекущих процессов \ Под. ред. Доктора техн. наук. А.Л. Михайлова. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2015. – 322 с.
2. M.S. Shaw, J.D. Jonson. Carbon clustering in detonations. J. Appl. Phys. 1987. v. 62. N 5, p. 2080.
3. P.K.Tang, "Modeling Hydrodynamic Behavior in Detonation". "Propellants, Explosives, Pyrotechnics" №16, 240-244 (1991).
4. P.K.Tang, "A Study of Detonation Processes in Heterogeneous High Explosives". J. Appl. Phys. 63(4), 1041-1051(1988).
5. В.М. Титов, В.Ф. Анисичкин, И.Ю. Мальков. Исследование процесса синтеза ультрадисперсного алмаза в детонационных волнах. Физика горения и взрыва. 1989. т.25, № 3.
6. J.A. Viecelli, F.H. Ree. Carbon particle phase transformation kinetics in detonation waves . J. Appl. Phys. 2000. v. 88, № 2, p. 683-690.
7. В.В. Даниленко. Фазовая диаграмма наноуглерода. Физика горения и взрыва. 2005. т. 41, № 4
8. И.И.Карпенко, В.Г.Морозов, С.С.Соколов, Л.В.Дмитриева, Н.В.Корепова, С.Ю.Суслова, Б.Н.Шамраев, Т.Л.Гребенникова, В.Б.Титова, С.М.Бахрах, Н.А.Володина, М.О.Ширшова. Модель ударно-волновой чувствительности ВВ с учетом предварительного ударного нагружения и разгрузки. Современное состояние. Доклад на Международной конференции IX Забавихинские Научные Чтения, 10-14 сентября 2007г., Снежинск, Россия.
9. Бахрах С.М., Ковалев Н.П., Применение метода расщепления для расчета упруго-пластических течений. - Труды Второй Всесоюзной конференции по численным методам решения задач теории упругости и пластичности. АН СССР. Сибирское отделение. Институт теоретической и прикладной механики. Новосибирск, 1971, с. 68-74.
10. Бахрах С.М., Величко С.В., Спиридонов В.Ф., Авдеев П.А., Артамонов М.В., Бакулина Е.А., Безрукова И.Ю., Борляев В.В., Володина Н.А., и т.д. Методика ЛЭГАК-3D расчета трехмерных нестационарных течений многокомпонентной сплошной среды и принципы ее реализации на

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.