

Таким образом, одним из способов снижения интенсивности процесса горения ВВ на основе октогена является использование высокодисперсного октогена с добавкой (~ 2 %) полиметилакрилата и (или) оксизина.

Список литературы

1. А.Ф. Беляев, В.К. Боболев, А.И. Коротков, А.А. Сулимов, С.В. Чуйко Переход горения конденсированных систем во взрыв. М., «Наука» 1973.
2. Л.А. Андреевских, С.А. Вахмистров, Д.А.Пронин, Е.В. Халдеев, Ю.В. Шейков Исследование развития конвективного горения в щели зарядов ВВ Физика горения и взрыва. 2015 т.51 № 6 стр.42 – 46
3. В.П. Привалко. Справочник по физической химии полимеров. Том 2. Свойства полимеров в блочном состоянии. Киев. Наукова думка. 1984 г.
4. Д.Д. Чегодаев. Фторопласты. Государственное научно-техническое издательство химической литературы. Ленинград. 1956 г.
5. С.П. Мадорский. Термическое разложение органических полимеров. Издательство «Мир». Москва. 1967 г.

КИНЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УДАРНОВОЛНОВОГО ИНИЦИИРОВАНИЯ ДЕТОНАЦИИ ГЕТЕРОГЕННЫХ ВВ С УЧЁТОМ РАЗОГРЕВА ОЧАГОВ

В.Н. Князев, Р.А. Воронков, Е.Н. Богданов, Е.В. Рычагов, А.В. Родионов

РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, Россия

В большинстве современных кинетических моделей детонации конденсированных взрывчатых веществ (ВВ) полагается, что развитие реакции химического разложения происходит в форме послыонного горения из сформированных на фронте ударной волны (УВ) очагов.

Однако данные экспериментальных и теоретических исследований преддетонационных процессов в твёрдых взрывчатых веществах при механических воздействиях невысокой интенсивности указывают на существование индукционного периода. Этот интервал времени обусловлен разогревом вещества в очаге и предшествует самоускорению реакции вследствие увеличения площади реакционной поверхности и переходу её в детонационный режим.

В данной работе предпринята попытка учёта индукционного периода с помощью новой двухстадийной кинетической модели детонации «ОЧАГ». Основные положения предложенной кинетической модели детонации сформулированы следующим образом:

1. На фронте ударной волны, распространяющейся по ВВ, формируются зоны локального разогрева, будем называть их горячими точками, температура в которых недостаточна для выполнения критерия Зельдовича [1] и образования волны стационарного горения. В горячих точках протекает гомогенная экзотермическая реакция в условиях теплообмена с окружающим материалом. Это положение принципиально отличает модель «ОЧАГ» от других современных кинетических моделей.

2. При выполнении критерия существования стационарной волны горения, то есть достижения определённой температуры, горячая точка становится очагом (зародышем). Гомогенная реакция разложения сменяется гетерогенной реакцией, которая происходит в форме послыонного горения из образовавшихся очагов.

В модели полагается, что на фронте ударной волны, в зависимости от её интенсивности, формируются горячие точки с характерными температурой T_{spot} и радиусом r_{spot} , распределённые в объёме материала с характерным расстоянием h_{spot} между ближайшими соседями. Расчётная оценка

температуры горячих точек T_{spot} , разогревающихся за счёт диссипативных процессов в УВ, выполняется в предположении их равномерного распределения. Для иллюстрации на рисунке 1 представлен простейший случай равномерного распределения горячих точек на плоскости.

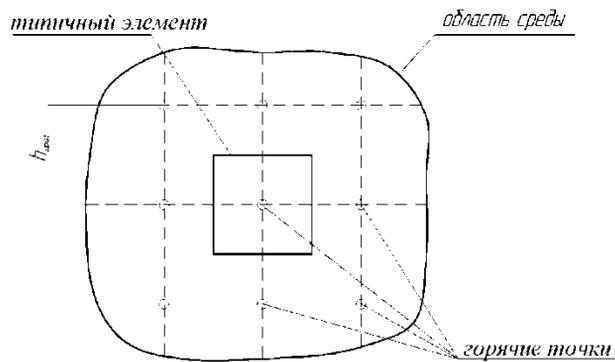


Рисунок 1. Двумерная схема равномерного расположения горячих точек в материале

Характерное расстояние между горячими точками h_{spot} и их радиус r_{spot} – эмпирические функции, вид и параметры которых определены, опираясь на экспериментальные данные опытов по исследованию возбуждения детонации, представленных ниже:

$$h_{spot} = \frac{a}{(e^{b \cdot \varepsilon_i^p} - 1)} \quad (1)$$

$$r_{spot} = c \cdot h_{spot}$$

где ε_i^p – интенсивность пластической деформации, a, b, c – константы.

Первая стадия описываемой кинетической модели детонации характеризуется разогревом горячих точек за счёт работы диссипативных процессов (прочность, вязкость, схлопывание пор и т.д.) и гомогенной экзотермической реакции разложения, протекающей в объёме горячей точки:

$$Q^+ = Q_{diss}^+ + Q_{chem}^+ \quad (2)$$

где Q_{diss}^+ – количество тепла, выделяемое в горячей точке за счёт диссипативных процессов;

Q_{chem}^+ – количество тепла, выделяемое в горячей точке за счёт химической реакции.

При равномерном распределении горячих точек, имеющих сферическую форму, скорость выделения тепла в каждой из них за счёт диссипативных процессов можно представить выражением:

$$\frac{dQ_{diss}^+}{dt} = \frac{3}{4 \cdot \pi} \cdot \left(\frac{h_{spot}}{r_{spot}} \right)^3 \cdot \frac{dQ_{diss}^{elem}}{dt} \quad (3)$$

где $\frac{dQ_{diss}^{elem}}{dt}$ – удельное по объёму количество тепла, выделяющегося за счёт диссипативных процессов в типичном элементе.

Скорость разогрева за счёт гомогенной экзотермической реакции в объёме горячей точки определяется в соответствии с упрощённой формой закона действующих масс и уравнением Аррениуса:

$$\frac{dQ_{chem}^+}{dt} = Q_0 \cdot \frac{d\alpha_{spot}}{dt} = Q_0 \cdot (1 - \alpha_{spot}) \cdot P \cdot A \cdot \exp\left(-\frac{E_A}{R \cdot T_{spot}}\right) \quad (4)$$

где Q_0 – удельная по объёму энергия взрывчатого превращения, α_{spot} – степень превращения в горячей точке, P – давление, A – предэкспонента в уравнении Аррениуса, E_A – энергия активации, R – универсальная газовая постоянная.

Кроме разогрева, в предложенной модели учитываются потери тепла в горячей точке за счёт теплообмена с окружающим её материалом. Скорость теплоотвода через поверхность горячей точки определяется с помощью эффективного коэффициента теплоотдачи и приводится к объёму горячей точки V_{spot} :

$$\frac{dQ^-}{dt} = \frac{\chi \cdot S_{spot} \cdot (T_{spot} - T_0)}{V_{spot}} \quad (5)$$

где $\chi = \frac{\delta^* \cdot 2,718 \cdot \lambda}{3 \cdot r_{spot}}$ - эффективный коэффициент теплоотдачи, λ - коэффициент

теплопроводности, S_{spot} - площадь поверхности горячей точки, T_0 - температура среды, окружающей горячую точку.

Выражение для коэффициента теплоотдачи получено для разрабатываемой модели путём сравнительного анализа критериев зажигания Н.Н. Семёнова [2] и Д.А. Франк-Каменецкого [3] с учётом критического параметра Франк-Каменецкого для сферы $\delta^*=3,32$ [4].

Таким образом, для определения температуры T_{spot} каждой горячей точки численным образом интегрируется уравнение теплового баланса:

$$c_v \cdot \rho \cdot \frac{dT_{spot}}{dt} = \frac{dQ^+}{dt} + \frac{dQ^-}{dt} \quad (6)$$

где c_v - удельная теплоёмкость при постоянном объёме, ρ - плотность, T_{spot} - текущая температура горячей точки, Q^+ - количество тепла, выделяемое в горячей точке; Q^- - количество тепла, отводимое от горячей точки в окружающий материал через её поверхность.

В данной модели принято, что волна стационарного горения формируется в горячей точке, когда она прогревается до температуры горения ВВ (например, для октогена $T_{крит}=3000$ К). С этого момента в модели гомогенная объёмная реакция разложения сменяется гетерогенной реакцией в конденсированном взрывчатом веществе, которая происходит в форме послойного горения из сформированных очагов. Эта реакция - есть вторая стадия в рассматриваемой модели.

В настоящее время для описания кинетики гетерогенного разложения ВВ широко применяется геометрико-вероятностный подход, заимствованный из топочимии, в котором полагается, что химическая реакция локализована на реакционной поверхности, эволюция которой обусловлена ростом и взаимодействием очагов. В предположении мгновенного образования зародышей, случайным образом распределённых по объёму среды, и постоянной скорости роста очага $u=dr/dt=const$ (r - текущий радиус очага), получено уравнение Авраами-Ефремова [5]:

$$[-\ln(1-\alpha)]^{1/n} = k(t-t_0) \quad (7)$$

где k - константа, $n=3$ - число направлений эффективного роста очага, t - время, t_0 - начальный момент времени.

Следует ещё раз отметить, что расчёт температуры горячих точек за счёт диссипативных сил проводится в упрощающем предположении о равномерном распределении горячих точек в объёме ВВ, в то время как для моделирования процесса послойного горения используется более общее предположение о случайном распределении очагов.

В рамках предлагаемой кинетической модели уравнение Авраами-Ерофеева модифицировано и в дифференциальной форме выглядит следующим образом:

$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{(36 \cdot \pi)^{1/3}}{h_{spot}} \cdot [-\ln(1-\alpha)]^{2/3} \cdot (1-\alpha) \cdot u \quad (8)$$

Это уравнение в новой модели детонации «ОЧАГ» определяет скорость гетерогенного разложения. Заметим, что уравнение (8) аналогично кинетическому уравнению модели КРАКАТОА [6].

Как и во многих других кинетических моделях детонационного превращения, полагается, что линейная скорость горения является функцией только давления $u=u(P)$. Для исследуемого в

настоящей работе ВВ на основе октогена, из анализа предварительных расчётов и учитывая значительный разброс результатов измерений линейной скорости горения в октогене [7], [8], в данной модели выбрана следующая зависимость скорости фронта волны горения:

$$u = \begin{cases} 50 \text{ м/с}, & \text{при } P < 10,8 \text{ ГПа} \\ (30 \cdot P - 275) \text{ м/с}, & \text{при } P \geq 10,8 \text{ ГПа} \end{cases} \quad (9)$$

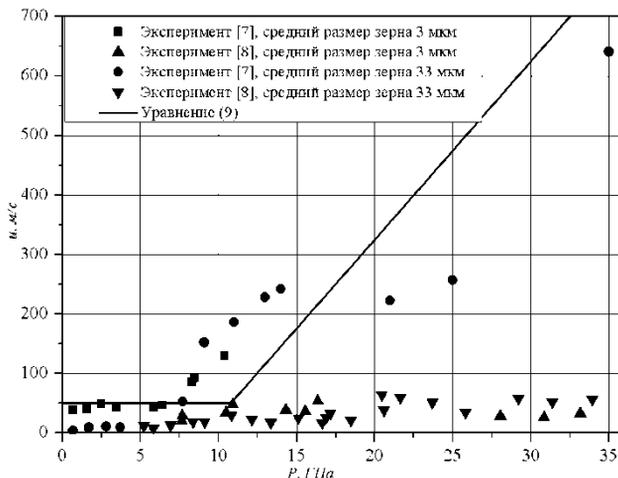


Рисунок 2. Зависимость линейной скорости горения от давления

На рисунке 2 представлены экспериментальные значения скорости горения и предложенная модельная зависимость уравнения (9).

Для описания деформирования среды используется простейшая модель идеального упругопластического тела, параметрами которой являются модуль сдвига G и предел текучести γ_d .

Для описания поведения твёрдой фазы ВВ и продуктов взрыва применяется широко известное уравнение состояния типа Ми-Грюнайзена JWL.

Кинетическая модель детонации «ОЧАГ» – уравнения (1)-(9) – внедрена в гидродинамический программный код.

Обоснование работоспособности новой модели выполнено с использованием результатов серии экспериментов по исследованию возбуждения детонации в ВВ на основе октогена плоскими ударными волнами малой интенсивности (смотри рисунок 3).

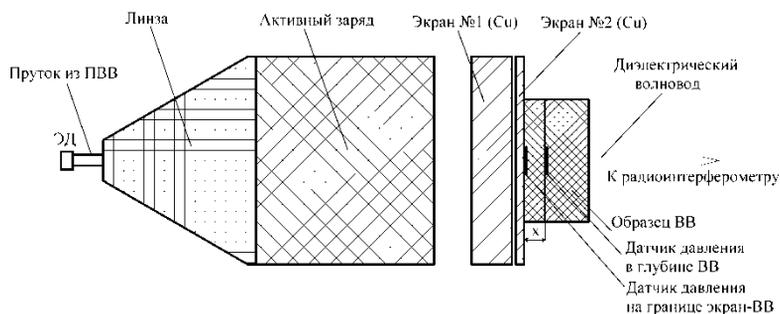


Рисунок 3. Эскиз экспериментальной сборки

Для создания в образце исследуемого ВВ ударной волны малой интенсивности использовалось плосковолновое нагружающее устройство разработки ИФВ. В данном устройстве ударная волна в экране из меди формируется при торможении продуктов взрыва активного заряда, плоская детонационная волна в котором создаётся генератором с профилирующей вставкой (линзой). Важным элементом таких устройств является наличие воздушного зазора между активным зарядом и экраном. Этот зазор обеспечивает формирование в экране ударной волны

прямоугольного профиля. Разновременность выхода ударной волны из экрана составляет 0,05-0,08 мкс в круге диаметром 80 мм. В опытах радиоинтерферометрической методикой определялась глубина и время задержки возбуждения детонации, а также с помощью манганиновых датчиков регистрировались временные зависимости давления в различных сечениях исследуемого ВВ.

С помощью модели детонации «ОЧАГ» проведено численное моделирование экспериментов в одномерном приближении по схеме, представленной на рисунке 4. В качестве начального условия задавалось давление на границе медного экрана, определенное в расчёте, моделировавшем работу генератора, детонацию в активном заряде ВВ и воздействие ПВ на медный экран в 2D приближении.

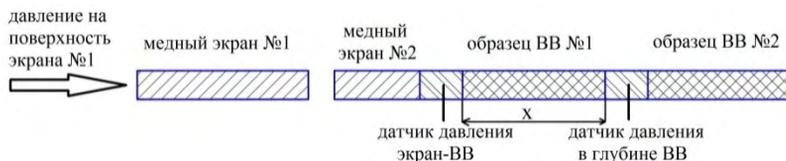
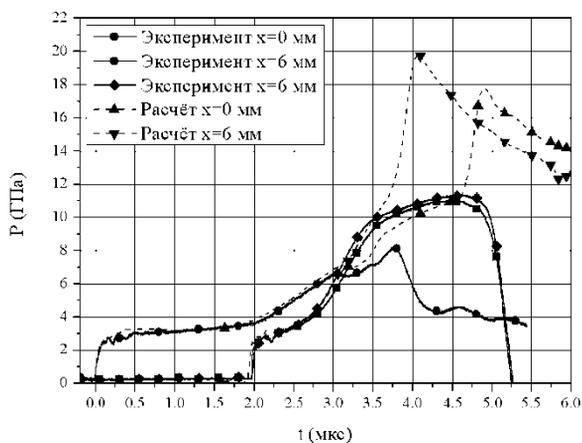
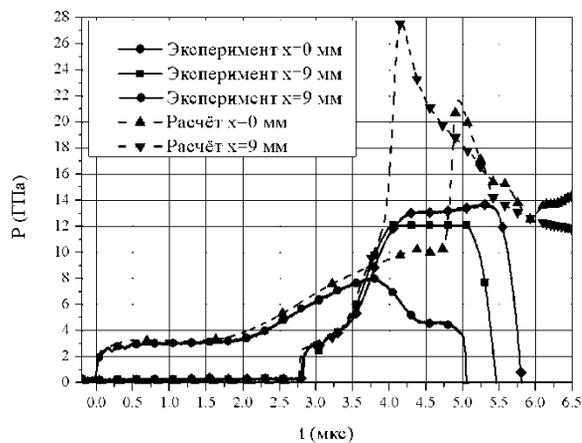


Рисунок 4. Расчетная схема

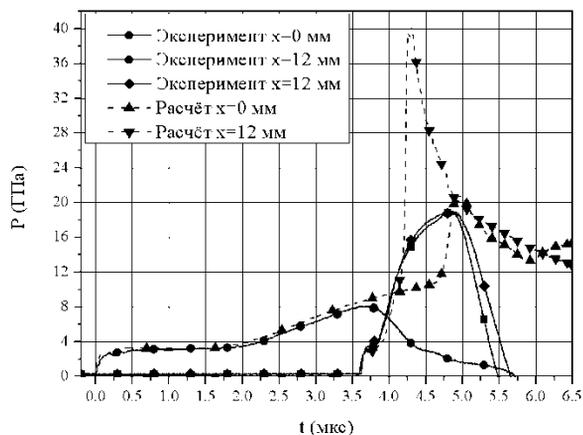
На рисунке 5 приведены временные зависимости давления, зарегистрированные манганиновыми датчиками, установленными на границе экран-ВВ ($x=0$ мм) и на разной глубине в образце ВВ ($x=6, 9, 12, 21$ мм). Там же представлены соответствующие расчётные зависимости.



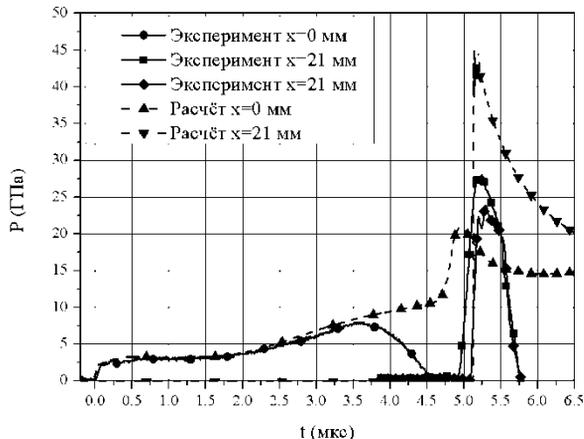
а) давление ударной волны 3 ГПа



б) давление ударной волны 3 ГПа

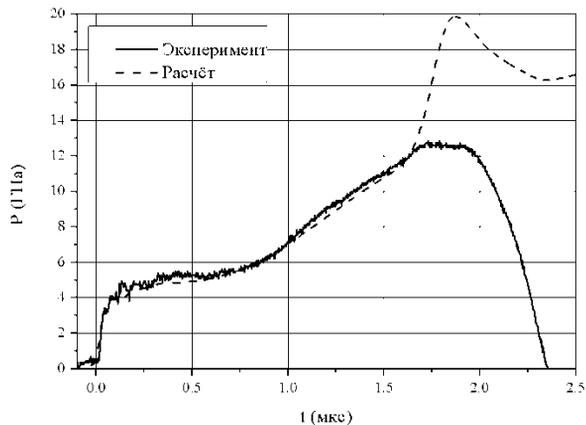


в) давление ударной волны 3 ГПа

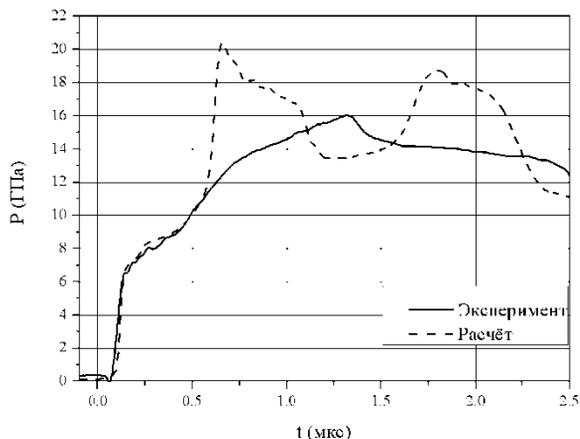


г) давление ударной волны 3 ГПа

Рисунок 5а-г. Временные зависимости давления (отсчет времени – от момента входа УВ в образец ВВ)



д) давление ударной волны 5 ГПа

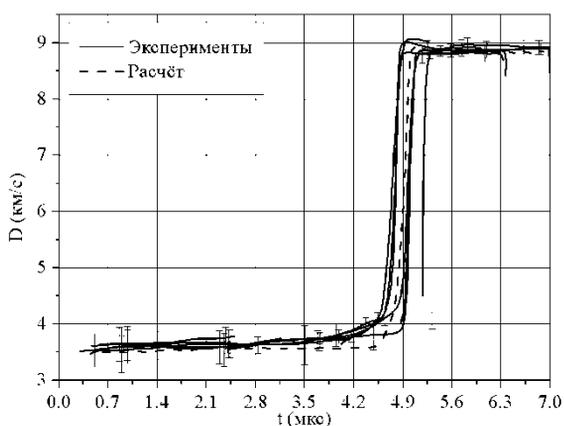


е) давление ударной волны 8 ГПа

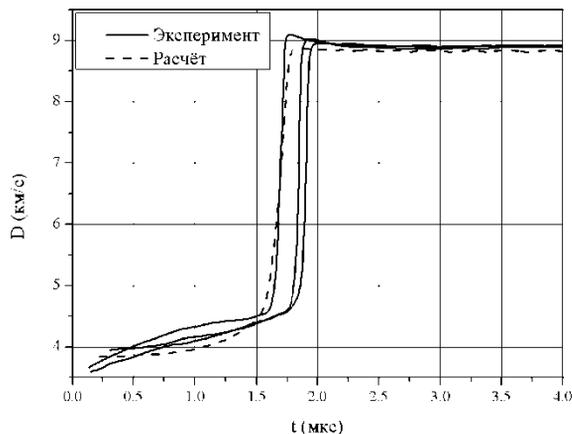
Рисунок 5д,е. Временные зависимости давления (отсчет времени – от момента входа УВ в образец ВВ)

Из рисунка 5 видно, что начальный участок и скорость нарастания давления в зоне интенсивного разложения у расчётных и экспериментальных кривых хорошо совпадают.

На рисунке 6 представлено сравнение совокупности экспериментальных зависимостей скорости фронта инициирующей волны от времени, полученных при помощи радиоинтерферометра, с соответствующими расчётными кривыми.



а) давление ударной волны 3 ГПа



б) давление ударной волны 5 ГПа

Рисунок 6. Сравнение экспериментальных и расчётных зависимостей скорости фронта инициирующей волны от времени (радиоинтерферометр) (отсчет времени – от момента входа УВ в образец ВВ)

График, представленный на рисунке 6а, свидетельствует, что в экспериментах с давлением ударной волны 3 ГПа вошедшая в образец ВВ ударная волна в начальный период времени распространяется практически с постоянной скоростью. Переход к детонационному режиму сопровождается скачком скорости фронта волны. В случае амплитуды УВ 5 ГПа (рисунок 6б) наблюдается схожая картина. Однако участок стационарной скорости фронта волны слабо выражен. Это связано с уменьшением времени разогрева горячих точек вследствие увеличения амплитуды входящей в ВВ ударной волны. Результаты численного моделирования в пределах экспериментального разброса и погрешности измерений удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными.

Заключение

В настоящей работе предпринята попытка описания новых экспериментальных данных о возбуждении детонации в составе на основе октогена слабыми ударными волнами посредством учёта в расчётах индукционного периода с помощью двухстадийной кинетической модели детонации «ОЧАГ». На первой стадии модели рассчитывается разогрев микроскопических объёмов ВВ (горячие точки) вследствие гомогенной экзотермической реакции в условиях теплообмена с окружающим материалом. При достижении определённой температуры горячая точка становится очагом, гомогенная реакция разложения сменяется гетерогенной и начинается стадия послойного горения ВВ. Расчёт разогрева горячих точек за счёт объёмной экзотермической реакции разложения принципиально отличает предложенную модель от прочих.

Использование этой новой модели при численном моделировании позволило корректно описать новые экспериментальные данные, полученные в рамках исследования особенностей процесса инициирования детонации в составе на основе октогена слабыми УВ.

Авторы выражают благодарность В.М. Бельскому и О.А. Тюпановой за полезные консультации и обсуждение модели.

Список литературы

1. Я.Б.Зельдович, Д.А.Франк-Каменецкий. Теория теплового распространения пламени. // ЖФХ, 1938, т. 12, №1, с. 100-105.
2. Н.Н.Семенов. К теории процессов горения. // Ж. Физика. 1928, т. 60, № 3, с. 241-250.
3. Д.А.Франк-Каменецкий. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. // М.: Наука, 1987, с. 494.
4. Б.В.Алексеев, А.М.Гришин. Физическая газодинамика реагирующих сред. // М.: Высшая школа, 1985, с. 464.
5. Б.В.Ерофеев. // ДАН СССР, 1946, №52, с. 511.
6. G.Damamme. Contribution à la théorie hydrodynamique de l'onde de détonation dans les explosifs condensés. // Thèse d'état présentée à l'université de Poitiers, 1987.
7. A.P.Esposito, D.L.Farber, J.M.Zaug, J.E.Reaugh. Reaction propagation rates in HMX at high pressure. // Combustion, Explosion and Shock Waves, 37(3), 2003, p. 83-88.
8. J.M.Zaug, C.E.Yong, G.T.Long, J.L.Maienschein, E.A.Glascoe, D.W.Hansen, J.F.Wardell, C.K.Black,G.B.Sykora. Deflagration rates of secondary explosives under static MPa-GPa pressure. // Shock Compression of Condensed Matter, 2009, p 420-423.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ТОНКИХ ПРЕГРАД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КИНЕТИКИ РАЗЛОЖЕНИЯ ВВ ВБЛИЗИ ФРОНТА ДЕТОНАЦИИ

В.И. Таржанов, А.В. Воробьёв, А.Н. Еськов, Д.П. Кучко, М.А. Ральников, Р.В. Комаров

РФЯЦ-ВНИИТФ, Снежинск, Россия

Известные на сегодня экспериментальные данные по ударной сжимаемости нереагирующих ВВ получены в диапазоне низких давлений $p \leq 16$ ГПа [1-4]. С другой стороны, в последние годы фотоэлектрическим и лазерно-интерферометрическим методами с высоким временным разрешением зарегистрированы параметры мощных и промышленных ВВ на пике Неймана (химпике), которые трактуются как точки ударной адиабаты ВВ, не реагирующего какое-то малое время за детонационным фронтом [5-11]. Закономерны вопросы – в течение какого времени