

УДК 662.215.5

Модель ударно-волновой чувствительности ВВ с учетом предварительного ударного нагружения и разгрузки. Современное состояние

Рассматривается современное состояние феноменологической модели кинетики детонации твердых гетерогенных ВВ. Модель позволяет учитывать влияние предварительной нагрузки и разгрузки на ударно-волновую чувствительность ВВ. Модель калибруется и верифицируется на большом числе специальных газодинамических и рентгенографических экспериментов, что позволяет использовать ее предсказательную способность в широком диапазоне ударно-волновых воздействий.

**В. Г. Морозов, И. И. Карпенко,
Л. В. Дмитриева, Н. В. Корепова,
С. Ю. Сулова, С. С. Соколов,
Б. Н. Шамраев, Т. Л. Гребенникова,
С. М. Бахрах, Н. А. Володина,
М. О. Ширшова, В. Б. Титова**

Модель кинетики детонации (МК) разрабатывается коллективом теоретиков и математиков под руководством В. Г. Морозова с опорой на эксперимент. Модель очаговая, основана на предположении о формировании горячих точек (ГТ) на неоднородностях структуры гетерогенных взрывчатых веществ (ВВ) при сжатии ударной волной, их росте (или затухании) в зависимости от давления в ВВ, схлопывании очагов при соприкосновении – переходе во взрыв. Уравнения макрокинетики опираются на функциональные зависимости, полученные при анализе роста единичного горячего очага в окружающем сжатом непрореагировавшем ВВ.

Основные требования к модели. В процессе численного моделирования необходимо воспроизводить:

- зависимость ударно-волновой чувствительности ВВ от начальной пористости;
- уменьшение чувствительности при предварительном нагружении (десенсбилизация);
- увеличение ударно-волновой чувствительности за волной разгрузки (сенсбилизация);
- учет многократных ударно-волновых воздействий;
- модель должна быть достаточно простой для расчета сложных многообластных геометрий

на современных ЭВМ.

Основные формулы модели

Модель МК исходит из обычных уравнений адиабатической газодинамики, в которых в правую часть уравнения баланса энергии добавлен член $Q\dot{\varphi}$:

$$\dot{\rho} = -\rho \operatorname{div} u; \quad (1)$$

$$\dot{u} = -\frac{1}{\rho} \operatorname{grad} P; \quad (2)$$

$$\dot{\varepsilon} = \frac{P}{\rho^2} \dot{\rho} + Q\dot{\varphi}. \quad (3)$$

Здесь точка над символом означает материальную производную по времени t . В каждой материальной точке φ – неубывающая функция от t – характеризует степень химического превращения исходного ВВ в ПВ, значение φ лежит в диапазоне от 0 до 1. Для реагирующего ВВ задается функция

$$P = p(\rho, \varepsilon, \varphi). \quad (4)$$

Для замыкания уравнений (1)–(4) необходимо задать алгоритм однозначного вычисления значения φ , его называют уравнением кинетики.

Конкретизируем вид функции (4). Для этого введем обозначения

$$P_{\text{ВВ}}(\rho, \varepsilon) = p(\rho, \varepsilon, 0); \quad (5)$$

$$P_{\text{ПВ}}(\rho, \varepsilon) = p(\rho, \varepsilon, 1). \quad (6)$$

Для функций (5) и (6) в модели МК используется форма Ми – Грюнайзена

$$p(\rho, \varepsilon) = f(\rho) + g(\rho)\varepsilon. \quad (7)$$

Для промежуточных значений φ ($0 < \varphi < 1$) в формуле (4) используют ту или иную формальную интерполяцию. В модели МК принята простая, линейная по φ интерполяция

$$p(\rho, \varepsilon, \varphi) = (1 - \varphi)P_{\text{ВВ}}(\rho, \varepsilon) + \varphi P_{\text{ПВ}}(\rho, \varepsilon). \quad (8)$$

Формулы первой стадии – формирование горячих очагов (Hot Spots):

$$z = \frac{A}{b^2} \frac{P - P_0}{V_0 - V} \exp(-b(V_0 - V)) [\exp(x) - 1 - x];$$

$$x = b(V_K - V); V_K = V_0 - (V_0 - V) \frac{P_K - P_0}{P - P_0};$$

$$w = \exp(-z);$$

$$W = w \text{ при } P \leq P_a; \quad W = 1 - \frac{1 - w}{1 - a(P - P_a)} \text{ при } P > P_a;$$

$$\varphi_0 = 1 - W, \quad A, b, P_K, P_a - \text{параметры модели.}$$

Формулы второй стадии – рост и взаимодействие очагов, переход в детонацию:

$$\Phi_1 = A_1 \varphi_0^{2/3} \varphi^{1/3};$$

$$f_1 = \Phi_1 \text{ при } \varphi \leq \varphi_C; \quad f_1 = \Phi_1 \left(\frac{1-\varphi}{1-\varphi_C} \right)^{2/3} \text{ при } \varphi > \varphi_C;$$

$$f_2 = A_2 \Phi_C \text{ при } \varphi \geq \varphi_C; \quad f_2 = 0 \text{ при } \varphi < \varphi_C;$$

$$\Phi_C = \frac{(\varphi - \varphi_C)^{2/3} (1-\varphi)^{1/3}}{1-\varphi_C};$$

$$f_3 = A_3 \Phi_C (\varphi_0 - \varphi_C) \text{ при } \varphi_0 \geq \varphi_C; \quad f_3 = 0 \text{ при } \varphi_0 < \varphi_C;$$

$$F = (f_1 + f_2 + f_3) P^2;$$

$$\dot{\varphi} = F; \quad A_1, A_2, A_3, \varphi_C - \text{параметры модели.}$$

Для ВВ на основе ТАТБ необходимо учитывать медленный процесс коагуляции атомов избыточного углерода в кластеры и дополнительное энерговыделение в процессе их роста

$$d\varepsilon_{cl} = kQ \left(1 - e^{-A \int \frac{\rho}{\tau} dt} \right);$$

τ – характерное время медленного энерговыделения. В газодинамике это дает дополнительный член в уравнении энергии $d\varepsilon = -PdV + Qd\varphi + d\varepsilon_{cl}$.

Модель калибруется и верифицируется на большом числе специальных экспериментов.

Как минимум, это:

- глубина преддетонационного участка при заданном давлении на границе ВВ (диаграммы Пополато);
- инициирование ВВ коротким импульсом воздействия при ударе тонких пластин;
- инициирование ВВ при отражении ударной волны от преграды из различных материалов – Al, Cu, Zn;
- численное моделирование критического диаметра конкретного ВВ;
- определение минимального размера инициатора, при котором происходит инициирование ВВ на расходящейся ударной волне;
- взаимодействие ударной и детонационной волн – десенсибилизация исследуемого ВВ при предварительном нагружении;
- инициирование детонации ВВ в области разгрузки – сенсбилизация;
- сенсбилизация при нагреве и другие опыты.

Для верификации модели широко используются специальные двумерные рентгенографические эксперименты инициирования детонации в критических и переходных режимах, в том числе с предварительным нагревом ВВ. Метод импульсной рентгенографии предоставляет большие возможности для получения экспериментальных данных с целью калибровки модели детонации, так как дает возможность визуализировать исследуемый процесс. Результаты расчетов визуально совмещаются с рентгенограммами, что позволяет сравнить положение фронтов детонации и невыгоревших зон в ВВ в расчете и эксперименте.

Модель включена в одномерные, двумерные и трехмерные газодинамические методики и имеет самосогласованный набор констант для ряда ВВ на основе ТАТБ, октогена, гексогена,

ТЭНа, который не изменяется при переходе от одномерных к двумерным и трехмерным расчетам. Для низкочувствительного ВВ на основе ТАТБ разработан алгоритм учета так называемых медленных реакций, связанных с экзотермической реакцией при коагуляции твердого атомарного углерода и роста кластеров за пределами зоны химической реакции в процессе детонации. Характерное время этого процесса сравнимо с газодинамическими временами и создает тонкое взаимодействие при численном моделировании. Модель позволяет рассчитывать количественно режимы неидеальной детонации – критический диаметр, переход детонации через инертную перегородку, инициирование ВВ ударом стального шарика и другие.

На рис. 1–5 приведено сравнение результатов расчета по модели МК с экспериментами по инициированию детонации.

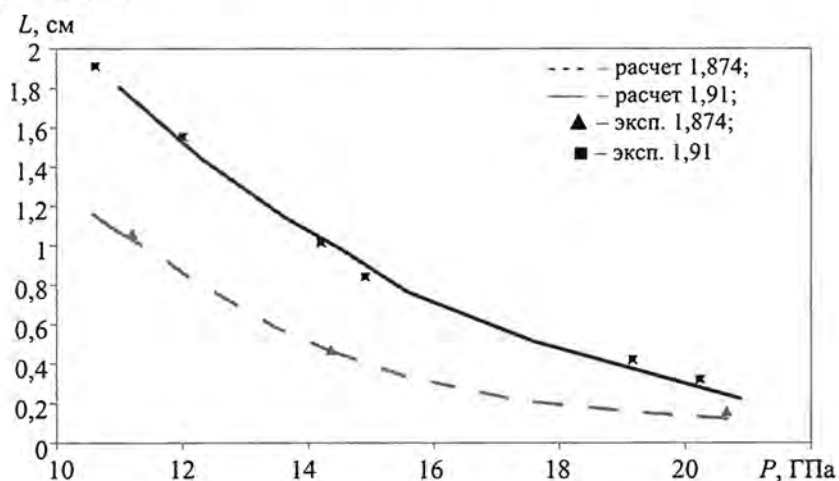


Рис. 1. Глубина преддетонационного участка в расчете и эксперименте для различной начальной плотности (1,91 и 1,874 г/см³) ВВ на основе ТАТБ

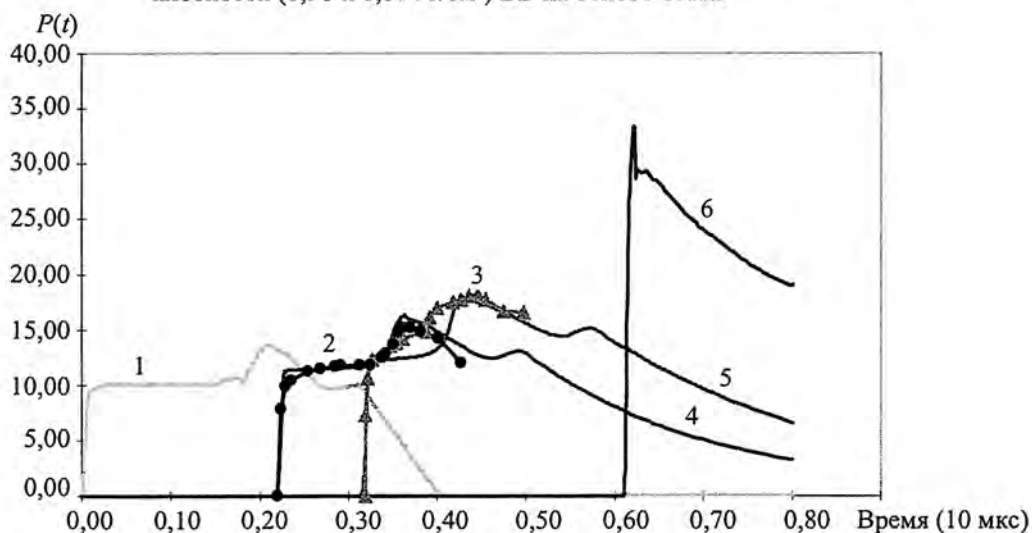


Рис. 2. Сравнение расчета и эксперимента по профилям нарастания давления в ВВ ТАТБ на стадии инициирования (на расстоянии 0, 1, 1,5 и 3 см от поверхности ВВ): 1 – $P(t)$ на границе ВВ; 2, 3 – $P(t)$ экспериментальное на глубине 1 см и 1,5 см в ВВ; 4, 5 – $P(t)$ расчетное на глубине 1 см и 1,5 см в ВВ; 6 – детонационный профиль в расчете на глубине ~ 3 см

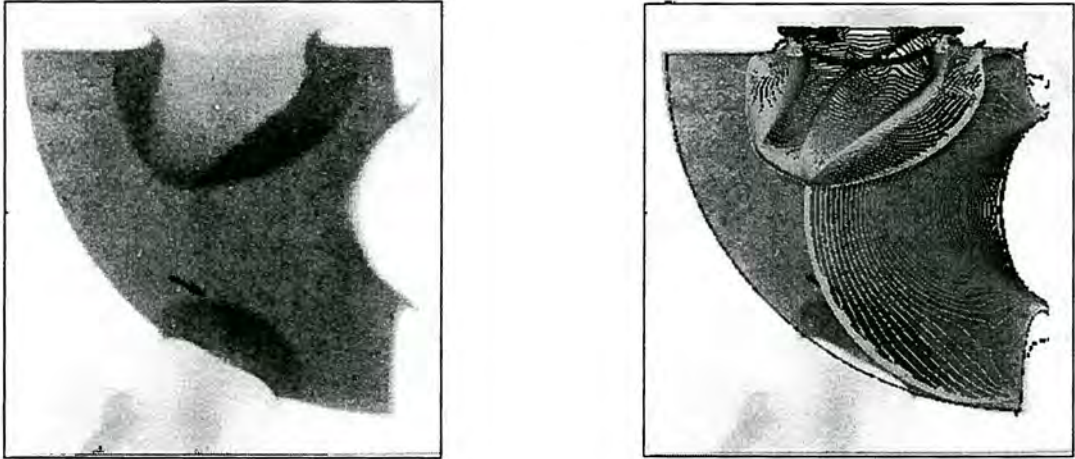


Рис. 3. Сравнение расчета и рентгенографического эксперимента (изолинии плотности совмещены с рентгенограммой) в опыте по взаимодействию ударных и детонационных волн в ВВ на основе ТАТБ

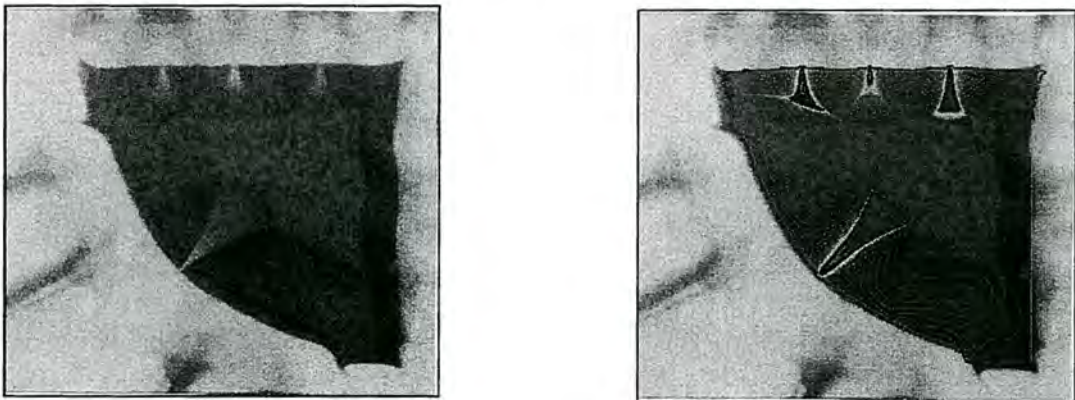


Рис. 4. Сравнение эксперимента и расчета в рентгенографическом опыте по инициированию ВВ на основе ТАТБ на столкновении расходящихся ударных волн



Рис. 5. Иницирование ВВ на основе ТАТБ в области предварительной разгрузки: 1 – ударная волна; 2 – ударный фронт; 3 – область сжатия; 4 – дважды сжатая непродетонировавшая область; 5 – детонационный фронт; 6 – фронт скользящей детонационной волны

Выводы

В работе представлены некоторые результаты численного моделирования опытов по иницированию и развитию детонации в ВВ на основе ТАТБ.

Расчеты проводились с использованием модели кинетики детонации МК [1], которая создана в ИТМФ коллективом теоретиков и математиков под руководством В. Г. Морозова с опорой на эксперименты ИФВ. Главной особенностью модели следует считать корректный учет влияния пористости, нагрева и предварительного нагружения с промежуточной разгрузкой на ударно-волновую чувствительность ВВ в расчетах.

Для верификации модели широко применялись двумерные рентгенографические опыты, которые на современном этапе дают не только наглядную картину положения фронтов ударных и детонационных волн, но и позволяют количественно определять среднюю плотность вещества за фронтом ударной и детонационной волн [2].

Модель включена в основные газодинамические методики ИТМФ и используется в одномерных, двумерных и трехмерных расчетах конструкций, содержащих ВВ.

Накоплен опыт применения модели в широком диапазоне многократных ударно-волновых воздействий. Модель без изменения констант применяется для расчета иницирования нагретого и пористого ВВ на основе ТАТБ.

Список литературы

1. Морозов В. Г., Карпенко И. И., Куратов С. Е. и др. Теоретическое обоснование феноменологической модели ударно-волновой чувствительности ВВ на основе ТАТБ // Химическая физика. 1995. Т. 14, № 2–3. С. 32.
2. Панов К. Н., Комрачков В. А. Исследование рентгенографическим методом эволюции профиля плотности вещества за фронтом расходящейся ударной волны во взрывчатом веществе // Физика горения и взрыва. 2004. Т. 40, № 5. С. 132–138.

The Model of Shock-Wave Sensitivity of HE in Terms of Preliminary Shock Loading and Rarefaction: Progress Report

V. G. Morozov, I. I. Karpenko, L. V. Dmitrieva, N. V. Korepova, S. Yu. Suslova,
S. S. Sokolov, B. N. Shamrayev, T. L. Grebennikova, S. M. Bakhrakh,
N. A. Volodina, M. O. Shirshova, V. B. Titova

The state-of-the-art phenomenological model of the kinetics of solid heterogeneous HE detonation is tackled upon. The model enables taking into account the effects, the preliminary loading and rarefaction pose on shock-wave sensitivity of HE. The model can be calibrated and verified via the variety of special gas-dynamic and radiographic experiments, which makes it usable for prediction purposes in a wide range of shock wave effects.