

# ПРОВЕРКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КРИТЕРИЕВ ВОЗБУЖДЕНИЯ ДЕТОНАЦИИ В МЕТОДИКЕ МИМОЗА

*Д. В. Мокин, Б. Н. Шамраев*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

На шестом международном симпозиуме по детонации в 1976 году было сделано несколько докладов и проведено обсуждение энергетических критериев возбуждения детонации [1–3]. Практика показала, что многие из этих критериев можно использовать для оценки качества подбора значений параметров в моделях детонации.

Простейший энергетический критерий формулируется в виде соотношения

$$P_i u_i t_i = \text{const},$$

где  $P_i$  – давление в инициирующей ударной волне,  $u_i$  – массовая скорость при этом давлении,  $t_i$  – длительность импульса, необходимая для возбуждения детонации.

Используя соотношения на фронте волны, это соотношение часто переписывают в виде

$$P_i^2 t_i = \text{const}.$$

В таблице приведены зарубежные данные из [4] по аппроксимации расчетных кривых Пополато для ВВ РВХ 9501.

Аппроксимации кривой Пополато для ВВ РВХ 9501

Начальная плотность, г/см <sup>3</sup>	$t_i$ , мкс, $P$ , ГПа
1,826	$\log(t_i) = 1,28 - 1,74 \log(P_i)$
1,830	$\log(t_i) = 1,37 - 1,78 \log(P_i)$
1,837	$\log(t_i) = 1,52 - 2,00 \log(P_i)$
1,844	$\log(t_i) = 1,70 - 2,23 \log(P_i)$

В методике МИМОЗА [5] в качестве одной из реализаций кинетики детонации используется феноменологическая модель детонации МК [6, 7], для которой сложилась следующая схема подбора значений параметров модели.

Первый этап начинается с выбора уравнения состояния ПВ, так как для некоторых ВВ в настоящее время используются различные уравнения состояния ПВ с различными характеристиками точки Жуге. Далее уточняются данные по ударной адиабате, довольно часто встречается ситуация, когда имеются экспериментальные данные только для начального участка адиабаты. Затем выбирается (однокомпонентная или двухкомпонентная) модель смеси уравнений состояния ПВ и ВВ. После этого подбираются значения параметров зажигания в модели, позво-

ляющие описать ударную адиабату. При необходимости уточняются значения параметров уравнения состояния ВВ.

На втором этапе проводится подбор значений параметров модели в уравнении горения ВВ за фронтом волны по описанию кривой Пополато – зависимости глубины возбуждения детонации от действующего давления. Следует отметить, что для некоторых ВВ максимальные значения экспериментальных данных давления для кривой Пополато значительно меньше по величине давления в точке Жуге, а наименьшее значение заметно превосходит минимальное давление необходимое для ударно-волнового возбуждения детонации.

На этих двух этапах обычно получается несколько наборов значений параметров и основная проблема – выбор наилучшего набора для описания «двумерных» опытов.

Первичная оценка качества полученного набора значений параметров выполняется проверкой наличия аппроксимации вида

$$\ln(P_i) = A + B \ln(t_i),$$

где  $A$  и  $B$  – постоянные для расчетной кривой Пополато.

Согласованность описания экспериментальных данных осуществляется проверкой аппроксимации

$$P_i^2 = A + \frac{B}{t_i},$$

соответствующей другому энергетическому критерию

$$\left( P_i^2 - P_{\min}^2 \right) t_i = \text{const},$$

где  $P_{\min}$  – минимальное давление, необходимое для возбуждения детонации при ударно-волновом воздействии.

Отклонение величины  $\sqrt{A}$  должно быть в пределах 10 – 20 % от  $P_{\min}$ . Среди предварительно отобранных наборов параметров встречаются ситуации, когда коэффициент  $A \leq 0$ . Такие наборы, как показала практика, дают неудовлетворительное описание экспериментов.

Таким образом, простейшие энергетические критерии используются для отбора перспективных наборов значений параметров.

Сказанное выше относится к импульсам давления большой длительности. Более тонкую проверку

энергетических критериев можно выполнить, проводя численное моделирование возбуждения детонации прямоугольными импульсами давления с амплитудой  $P_m$  и длительностью  $t_m$ .

На рис. 1 приведены типичные зависимости времени возбуждения детонации  $t_{\text{возб}}$  от длительности импульса для нескольких значений давления. Аналогичный вид имеют зависимости глубин возбуждения детонации, показанные на рис. 2.

Легко заметить, что кривые по виду напоминают гиперболы. При больших длительностях импульса воспроизводятся точки кривой Пополато. Большим временам и глубинам возбуждения детонации соответствуют минимальные длительности импульса  $t_{\text{min}}$ , которые можно оценить для различных значений  $P_m$ .

Ударно-волновое воздействие оценивается по мощности

$$W_m = P_m u_m,$$

где массовая скорость  $u_m$  пересчитывается по ударной адиабате.

Оказывается, что связь между  $t_{\text{min}}$  и  $W_m$  достаточно хорошо аппроксимируется соотношениями типа

$$t_{\text{min}} = A + \frac{B}{W_m}.$$

В этом, собственно говоря, заключается смысл энергетических критериев. Для заданного давления можно оценить минимальную длительность импульса, необходимую для возбуждения детонации, и, наоборот, для заданной длительности импульса можно оценить минимальное давление.

В частности, значение коэффициента  $B$  позволяет оценить минимальную энергию, которую должен «передать» импульс давления при возбуждении детонации.

С помощью этого критерия можно оценить длительность импульса для значений давления, соответствующих точкам Жуге и химпика. А именно, оценить длительность горения ВВ, которое должно быть порядка нескольких десятков наносекунд.

С практической точки зрения оказывается полезным наличие подобия кривых, приведенных на рис. 1. При наличии импульса давления со значением  $P_m$  по кривой Пополато оценивается время  $t_{\text{поп}}$ . По ударной адиабате оценивается мощность воздействия  $W_m$ , а затем по построенной выше аппроксимации – минимальное время воздействия  $t_{\text{min}}$ , необходимое для возбуждения детонации.

Оказывается, что зависимости времен возбуждения детонации  $t_{\text{возб}}$  от длительности импульса  $t_m$ , приведенные на рис. 1, «ложатся» в пределах точности вычислений на одну кривую в координатах

$$\frac{t_m}{t_{\text{min}}} \quad \text{и} \quad \ln \left( 1 - \frac{t_{\text{поп}}}{t_{\text{возб}}} \right).$$

Вид кривой приведен на рис. 3.

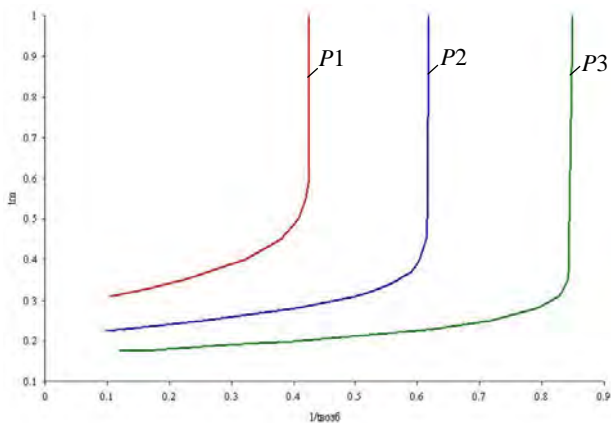


Рис. 1. Типичные зависимости времени возбуждения детонации  $t_{\text{возб}}$  от длительности импульса  $t_m$  для нескольких значений давления  $P_m$  ( $P1 > P2 > P3$ )

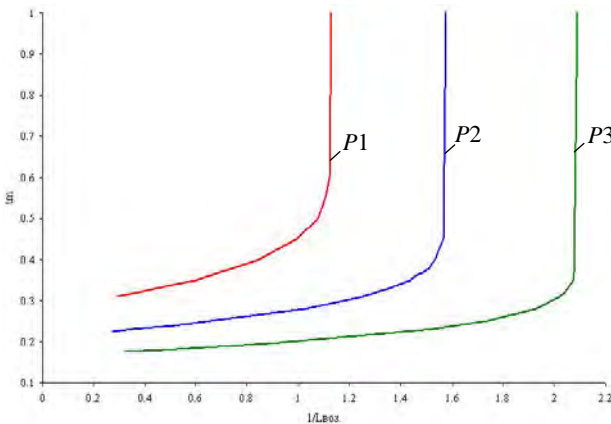


Рис. 2. Типичные зависимости глубины возбуждения детонации  $L_{\text{возб}}$  от длительности импульса  $t_m$  для нескольких значений давления  $P_m$  ( $P1 > P2 > P3$ )

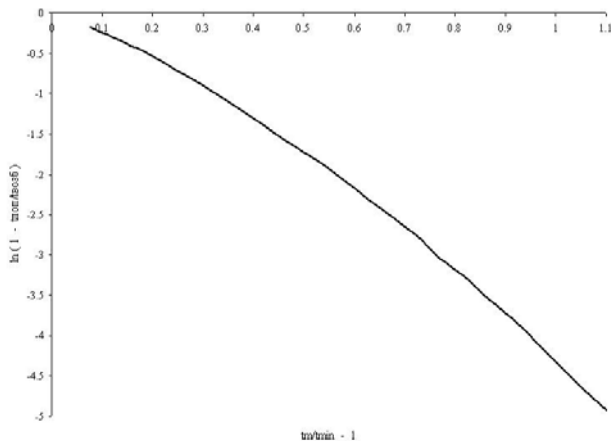


Рис. 3

Реальные импульсы давления имеют колоколообразную форму зависимости от времени. Можно вводить эффективное давление и длительность импульса. В таком виде мы проверили предсказания зависимости при численном моделировании экспериментов. Было получено хорошее согласие с результатами двумерных расчетов и экспериментальными данными.

Подводя итоги, констатируем, что в рамках модели МК выполняются энергетические критерии возбуждения детонации. В перспективе их можно использовать для оценки времен задержки возбуждения детонации при проведении расчетов с кинетикой, контролирующей скорость навязанного энерговыделения.

## Литература

1. Howe P., Frey R., Taylor B., Boyle V. Shock Initiation and the Critical Energy Concept // 6th International Detonation Symposium, August 24–27th, 1976. P. 11–19.

2. Stresau R. H., Kennedy J. E. Critical Conditions for Shock Initiation of Detonation in Real Systems // Ibid. P. 68–75.

3. Walker F. E., Cowperthwaite M., Frey R. et al/ Discussion on Shock Initiation and  $P^2 \tau$  // 6th International Detonation Symposium, August 24–27th, 1976. P. 82–94.

4. Gustavsen R. L., Sheffield S. A., Alcon R. R., Hill R. G. Shock Initiation of New and Aged PBX 9501 // 12th International Detonation Symposium, July 11–16th, 2002.

5. Софронов И. Д., Афанасьева Е. А., Винокуров О. А. и др. Комплекс программ МИМОЗА для решения многомерных задач механики сплошной среды на ЭВМ Эльбрус-2 // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 1990. Вып. 2. С. 3–9.

6. Морозов В. Г., Карпенко И. И., Ольхов О. В. и др. Расчетное моделирование с опорой на эксперименты инициирования и развития детонации ВВ на основе ТАТБ с учетом десенсибилизации при взаимодействии ударной и детонационной волн: Препринт № 37. Арзамас-16: РФЯЦ–ВНИИЭФ, 1995.

7. Морозов В. Г., Карпенко И. И., Куратов С. Е. 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.