

УДК 662.215.5+534.222.2

О ВЛИЯНИИ МЕЖФАЗНОГО ТЕПЛООБМЕНА НА КРИТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ УДАРНО-ВОЛНОВОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ ХИМИЧЕСКОЙ РЕАКЦИИ В ПОРИСТЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛАХ

А. В. Аттетков, Е. В. Пилявская

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, 105005 Москва
e.pilyavskaya@mail.ru

Представлены результаты численного анализа вязкопластической модели процесса формирования горячих точек, базирующейся на твердофазном механизме очагового воспламенения пористого энергетического материала при ударно-волновом нагружении. Изучен сильновязкий режим схлопывания пор, представляющий наибольший интерес в теоретических исследованиях процесса ударно-волнового инициирования гетерогенных энергетических материалов. Описание межфазного теплообмена проводилось в предположении, что газ является совершенным и допустимо использование условия его гомобаричности (однородности по давлению). Проведен параметрический анализ и установлены специфические особенности влияния теплопереноса и межфазного теплообмена на критические условия ударно-волнового инициирования химической реакции в пористом энергетическом материале.

Ключевые слова: пористый энергетический материал, вязкопластическая модель горячих точек, межфазный теплообмен, ударно-волновое инициирование.

DOI 10.15372/FGV20170311

В теоретических исследованиях ударно-волнового инициирования твердых энергетических материалов (ЭМ) особое место занимает вязкопластическая модель горячих точек — локализованных зон динамического перегрева ударно-сжатого ЭМ. Бурное развитие этих исследований относится к середине 80-х годов прошлого столетия (см., например, работу [1] и библиографию в ней), но они также активно продолжают и в настоящее время. Используемые в последние годы методы математического моделирования позволили провести параметрический анализ и установить специфические особенности влияния теплопереноса и межфазного теплообмена на температурное поле пористого ЭМ, формируемое при ударно-волновом нагружении [2, 3]. Заметим, что обсуждение вопроса о влиянии воздушных (газовых) пор или других включений [4, 5] на температурное состояние ударно-сжатого пористого ЭМ приводит к достаточно противоречивым выводам.

Несмотря на достигнутый прогресс в изучении вязкопластической модели горячих точек, ряд вопросов требует дальнейшего разви-

тия. В частности, актуальным остается вопрос о влиянии межфазного теплообмена на критические условия ударно-волнового возбуждения химической реакции в пористом ЭМ. Изучение этого вопроса является основной целью настоящей работы.

Рассматривается задача о стационарной ударной волне (УВ), распространяющейся со скоростью D в двухфазном пористом ЭМ — несжимаемой вязкопластической среде с постоянным пределом текучести Y и постоянной вязкостью η , содержащей заполненные газом сферические поры радиуса a (регулярная ячеистая схема [6]). При этом предполагается:

- 1) характерная ширина фронта УВ много больше размера пор и расстояния между ними [7–9];
- 2) реализуется сильновязкий режим [1] пластического затекания пор с сохранением их сферической формы;
- 3) объемным содержанием газовой фазы в единице объема пористого ЭМ можно пренебречь;
- 4) газ является совершенным, с постоянным показателем адиабаты γ , допустимо использование условия гомобаричности (однородности по давлению) при изучении межфазного теплообмена [6, 10];

5) анализируется твердофазный механизм формирования горячих точек [1], кинетические закономерности при воспламенении описываются реакцией нулевого порядка.

С учетом допущений 1–3 и ранее полученных результатов [3, 8] интегралы уравнений сохранения массы и импульса пористого ЭМ в системе координат, связанной с УВ, можно представить в следующем виде:

$$p - p_0 = \rho_s D^2 (\alpha_0 - \alpha) \alpha_0^{-2}, \quad (1)$$

справедливом для всех промежуточных состояний во фронте волны, где

$$p_0 = \frac{2Y}{3} \ln \frac{\alpha_0}{\alpha_0 - 1}$$

— амплитуда упругого предвестника. При этом зависимости между среднеинтегральными и фазовыми значениями величин определяются как

$$p = \alpha^{-1} [p_s + (\alpha - 1)p_g],$$

$$\rho = \frac{\rho_s + (\alpha - 1)\rho_g}{\alpha} \approx \frac{\rho_s}{\alpha}, \quad \alpha = \frac{b^3}{b^3 - a^3}.$$

Здесь ρ — плотность, α — параметр пористости, b — радиус сферического объема характерного (представительного) элемента двухфазного пористого ЭМ, индекс 0 соответствует параметрам состояния ЭМ перед фронтом УВ, s — твердой фазе, g — газовой.

Результирующее уравнение связи $\phi(p, \alpha) = 0$, определяющее скачок начального состояния ЭМ на фронте УВ в (1), динамически неравновесно и в изучаемом (сильновязком) режиме затекания пор имеет вид

$$p = p_\eta(\dot{\alpha}, \alpha) + p_Y(\alpha) + p_g, \quad (2)$$

где

$$p_\eta(\dot{\alpha}, \alpha) = -\frac{4\eta\dot{\alpha}}{3\alpha(\alpha - 1)}, \quad p_Y(\alpha) = \frac{2Y}{3} \ln \frac{\alpha}{\alpha - 1},$$

$\dot{\alpha} = 3a_0^{-3}(\alpha_0 - 1)a^2\dot{a}$ — скорость деформации ЭМ во фронте УВ, точкой обозначена производная по переменной t .

Функция $p_g = p_g(t)$ в (2) на стадии, предшествующей возбуждению химической реакции, при выполнении условия гомобаричности [6, 10] определяется из решения задачи:

$$\frac{dp_g(t)}{dt} = \frac{3}{a} \{ -(\gamma - 1)q(r, t)|_{r=a} - \gamma p_g(t)\dot{a} \}, \quad t > 0; \quad (3)$$

$$p_g(0) = p_{g0}; \quad a(0) = a_0; \quad \dot{a}(0) = 0.$$

При этом задача идентификации плотности теплового потока на подвижной границе $r = a(t)$

$$q(r, t)|_{r=a} = -\lambda_g \frac{\partial T(r, t)}{\partial r} \Big|_{r=a} \quad (4)$$

приводит к необходимости решения задачи об определении температурного поля $T(r, t)$, $0 \leq r \leq a$, $t \geq 0$, газовой фазы двухфазного пористого ЭМ. Заметим, что наличие градиентов температуры приводит также к отклонению профиля скорости $v_r(r, t)$ от линейного [6]:

$$v(r, t) = \frac{r}{a} v_r(r, t)|_{r=a} + \frac{\gamma - 1}{\gamma p_g(t)} \left\{ \lambda_g \frac{\partial T(r, t)}{\partial r} - \frac{r}{a} \left[\lambda_g \frac{\partial T(r, t)}{\partial r} \right] \Big|_{r=a} \right\}, \quad 0 \leq r \leq a, \quad t \geq 0. \quad (5)$$

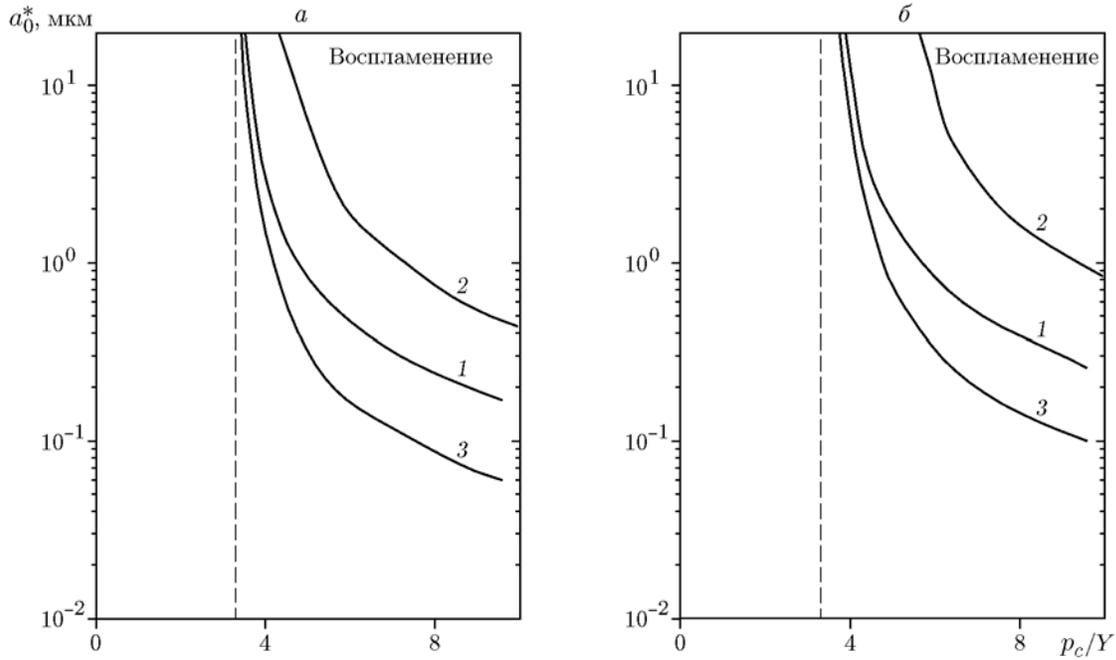
Равенство (5) значительно упрощает численный анализ реализуемой математической модели.

С учетом исходных допущений математическую модель ударно-волнового возбуждения химической реакции в пористом ЭМ можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned} \rho_g c_g \left[\frac{\partial T(r, t)}{\partial t} + v_r \frac{\partial T(r, t)}{\partial r} \right] &= \\ &= \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left[\lambda_g r^2 \frac{\partial T(r, t)}{\partial r} \right] + \frac{dp_g(t)}{dt}, \\ &0 \leq r < a(t), \quad t > 0; \end{aligned}$$

$$\rho_g(r, t) = [R_g T(r, t)]^{-1} p_g(t);$$

$$\begin{aligned} \rho_s c_s \left[\frac{\partial T(r, t)}{\partial t} + v_r \frac{\partial T(r, t)}{\partial r} \right] &= \\ &= \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left[\lambda_s r^2 \frac{\partial T(r, t)}{\partial r} \right] - 2Y \frac{v_r}{r} + 12\eta \left(\frac{v_r}{r} \right)^2 + \\ &+ Q_s z \exp \left\{ -\frac{E_s}{R_g T(r, t)} \right\}, \quad a(t) < r < b(t), \quad t > 0; \end{aligned}$$



Влияние вязкости и предела текучести на порог возбуждения химической реакции в пористом ЭМ при отсутствии (а) и наличии (б) газа в порах:

1 — $\eta = 10 \text{ Па} \cdot \text{с}$, $Y = 0.2 \text{ ГПа}$, 2 — $\eta = 10 \text{ Па} \cdot \text{с}$, $Y = 0.1 \text{ ГПа}$, 3 — $\eta = 1 \text{ Па} \cdot \text{с}$, $Y = 0.2 \text{ ГПа}$

$$v_r = \dot{a}(a/r)^2; \quad r^3 = r_0^3 + a^3(t) - a_0^3; \quad (6)$$

$$a(0) = a_0; \quad \dot{a}(0) = 0; \quad T(r, 0) = T_0; \quad \rho_g(r, 0) = \rho_{g0};$$

$$v_r(a(t) - 0, t) = v_r(a(t) + 0, t) = \dot{a}(t);$$

$$\left. \frac{\partial T(r, t)}{\partial r} \right|_{r=0} = 0; \quad v_r(r, t)|_{r=0} = 0;$$

$$\left. \frac{\partial T(r, t)}{\partial r} \right|_{r=b(t)} = 0;$$

$$T(a(t) - 0, t) = T(a(t) + 0, t);$$

$$\lambda_g \left. \frac{\partial T(r, t)}{\partial r} \right|_{r=a(t)-0} = \lambda_s \left. \frac{\partial T(r, t)}{\partial r} \right|_{r=a(t)+0},$$

а закон движения границы поры $r = a(t)$ определяется из решения задачи:

$$\frac{da}{dt} = \frac{\alpha a}{4\eta} \left\{ p_g(t) - p_e + \frac{2Y}{3} \ln \frac{\alpha}{\alpha - 1} \right\}, \quad t > 0; \quad (7)$$

$$a(0) = a_0; \quad \alpha = 1 + (a/a_0)^3(\alpha_0 - 1).$$

Здесь p_e — амплитуда УВ, c — удельная теплоемкость, λ — теплопроводность, R_g — универсальная газовая постоянная, Q_s , E_s — тепловой эффект и энергия активации химической реакции соответственно, z — предэкспоненциальный множитель.

Численный анализ математической модели (3)–(7) проводился разностным методом с применением неявной конечно-разностной схемы. Для представления результатов численных экспериментов использованы следующие безразмерные параметры:

$$\text{Re} = \frac{a_0 \sqrt{\rho_s p_e}}{\eta}, \quad \text{Pr} = \frac{c_s \eta}{\lambda_s}, \quad \beta = \frac{Y}{p_e},$$

$$\Lambda_{g0} = \frac{\lambda_{g0}}{\lambda_g}, \quad \varepsilon_{g0} = \frac{c_{g0} \rho_{g0}}{c_s \rho_s}, \quad \pi_{g0} = \frac{p_{g0}}{p_e}.$$

Для случая отсутствия газа в порах ($\pi_{g0} \equiv 0$) параметрический анализ результатов численных экспериментов выполнен в работах [1, 8]. Используемые в расчетах данные о теплофизических и термокинетических свойствах соответствуют ТНТ и приведены в [8].

На рисунке частично представлены результаты расчетов, иллюстрирующие зависимость критического радиуса a_0^* воспламенения

ЭМ с начальной пористостью $\varphi_0 = 0.1$ ($\alpha_0 = 1.11$) от безразмерного параметра $\beta^{-1} = p_e/Y$ при различных значениях вязкости и предела текучести. Расчет проведен при $Re = 0.1$, $Pr = 10^4$, $\Lambda_{g0} = 0.1$, $\varepsilon_{g0} = 0.6$, $\pi_{g0} = 10^{-3}$, $\gamma = 1.4$. Штриховая линия на рисунке соответствует амплитуде УВ, определяющей нижний предел $p_e \equiv p_{ign}^*$ возбуждения химической реакции в отсутствие теплообмена в ударно-сжатом пористом ЭМ ($Y = 0.2$ ГПа) [1]. Заметим, что фактическое пороговое значение p_{ign} отличается от p_{ign}^* ($p_{ign} > p_{ign}^*$, см. рисунок) вследствие теплопереноса в процессе пластического затекания пор.

Результаты исследований, проведенных ранее в [1, 3] и в настоящей работе, приводят к следующим заключениям:

1) в сильновязком режиме затекания пор ($Re \ll 1$) существенное влияние на формирование горячих точек в ударно-сжатом пористом ЭМ оказывает число Прандтля — критерий, характеризующий взаимодействие двух диффузионных процессов: внутренней тепловой диссипации вследствие вязкого трения и теплопроводности;

2) процесс межфазного теплообмена не оказывает значительного влияния ни на формируемое температурное поле, ни на критические условия ударно-волнового возбуждения химической реакции в двухфазном пористом ЭМ. Доминирующими являются диффузионные процессы в твердой фазе ЭМ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хасаинов Б. А., Аттетков А. В., Борисов А. А. Ударно-волновое инициирование пористых энергетических материалов и вязкопластическая модель горячих точек // Хим. физика. — 1996. — Т. 15, № 7. — С. 53–125.
2. Attetkov A. V., Golovina E. V., Ermolaev B. S. Mathematical simulation of mesoscopic processes of heat dissipation and heat transfer in a two-phase porous material subjected to shock compression // J. Heat Transfer Res. — 2008. — V. 39, N 6. — P. 479–487.
3. Аттетков А. В., Ермолаев Б. С., Пилявская Е. В. Влияние межфазного теплообмена на процесс формирования температурного поля в ударно-сжатом пористом материале // Тепловые процессы в технике. — 2011. — Т. 3, № 7. — С. 333–337.
4. Андреев С. Г. Влияние невзрывчатых химических добавок на разложение энергетических материалов при низкоскоростных механических и ударно-волновых воздействиях // Хим. физика. — 2000. — Т. 19, № 2. — С. 76–81.
5. Клименко В. Ю., Кривченко А. Л., Кривченко А. А. Механизм ударно-волнового инициирования гексогена с различными наполнителями // Ударные волны в конденсированных средах: материалы междунар. конф. — СПб., 2008. — С. 199–208.
6. Нигматулин Р. И. Динамика многофазных сред. — М.: Наука, 1987.
7. Дунин С. З., Сурков В. В. Динамика закрытия пор во фронте ударной волны // Прикл. математика и механика. — 1979. — Т. 43, вып. 3. — С. 511–518.
8. Аттетков А. В., Соловьев В. С. О возможности разложения гетерогенных ВВ во фронте слабой ударной волны // Физика горения и взрыва. — 1987. — Т. 23, № 4. — С. 113–125.
9. Киселев С. П., Руев А. П., Трунев А. П. и др. Ударно-волновые процессы в двухкомпонентных и двухфазных средах. — Новосибирск: Наука, 1992.
10. Нигматулин Р. И., Хабеев Н. С. Теплообмен газового пузырька с жидкостью // Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа. — 1974. — № 5. — С. 94–100.

Поступила в редакцию 9/VIII 2016 г.