

А. В. Аттетков, Е. В. Пилывская

**ВЛИЯНИЕ МЕЖФАЗНОГО ТЕПЛООБМЕНА  
НА КРИТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ  
УДАРНО-ВОЛНОВОГО ИНИЦИИРОВАНИЯ  
ОЧАГОВОЙ ХИМИЧЕСКОЙ РЕАКЦИИ  
В ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ МАТЕРИАЛЕ**

*Методами математического моделирования исследованы специфические особенности влияния процесса межфазного теплообмена на критические условия возбуждения очаговой химической реакции в ударно-сжатом пористом энергетическом материале.*

**E-mail: e.pilyavskaya@mail.ru**

**Ключевые слова:** вязкопластический пористый энергетический материал, ударно-волновое нагружение, критические условия инициирования химической реакции.

В исследованиях по ударно-волновой чувствительности пористых энергетических материалов (ЭМ) важное место занимает вязкопластический механизм образования горячих точек — локализованных зон динамического перегрева ударно-сжатого ЭМ. Несмотря на достигнутые результаты по рассматриваемой проблеме (см., например, обзор [1] и цитируемую в нем литературу), актуальным остается вопрос о влиянии процесса межфазного теплообмена на формируемое температурное поле и критические условия ударно-волнового инициирования очаговой химической реакции в пористом ЭМ. Его изучение является основной целью проведенного исследования.

Рассмотрим задачу о стационарной ударной волне (УВ) [2–6], распространяющейся со скоростью  $D$  в двухфазном пористом ЭМ — несжимаемой вязкопластической среде (фаза “ $s$ ”), содержащей заполненные газом (фаза “ $g$ ”) сферические поры радиуса  $a$  (регулярная ячеистая схема [7]). При этом приняты следующие допущения:

- 1) характерная длина УВ много больше размера пор и расстояния между ними [1–6];
- 2) реализуется сильновязкий режим [1] затекания пор с сохранением их сферической формы;
- 3) объемным содержанием фазы “ $g$ ” в единице объема двухфазного пористого ЭМ можно пренебречь;
- 4) газ является совершенным и допустимо использование условия его гомобаричности при изучении процесса межфазного теплообмена в системе [6–8].

Заметим, что реализация сильновязкого режима затекания пор определяет существование волны с монотонным профилем [2, 4]; на ее структуру в этом случае существенное влияние могут оказывать

мезоскопические процессы теплопереноса [1, 3, 4] и межфазного теплообмена [6].

При сделанных предположениях зависимости между среднеинтегральными и фазовыми значениями величин определяются как

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

$$\rho = \rho_s/\alpha; \alpha = b^3/(b^3 - a^3)$$

( $p$  – давление,  $\rho$  – плотность,  $b$  – радиус выделенного сферического объема характерного (представительного) элемента двухфазного материала), а математическая модель процесса образования горячих точек в ударно-сжатом ЭМ принимает следующий вид:

$$\rho_g c_g \left( \frac{\partial T}{\partial t} + v_r \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda_g r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{dp_g(t)}{dt}, 0 < r < a(t), t > 0;$$

$$\frac{dp_g(t)}{dt} = \frac{3(\gamma - 1)}{a(t)} \left\{ \lambda_g \frac{\partial T(r, t)}{\partial r} \Big|_{r=a(t)} - \frac{3\gamma p_g(t)}{a(t)} v_r(r, t) \Big|_{r=a(t)} \right\};$$

$$v_r(r, t) = \frac{r}{a(t)} v_r(r, t) \Big|_{r=a(t)} + \frac{\gamma - 1}{\gamma p_g(t)} \left\{ \lambda_g \frac{\partial T(r, t)}{\partial r} - \right.$$

$$\left. - \frac{r}{a(t)} \left[ \lambda_g \frac{\partial T(r, t)}{\partial r} \right] \Big|_{r=a(t)} \right\}, 0 < r < a(t), t > 0;$$

$$c_s \rho_s \left( \frac{\partial T}{\partial t} + v_r \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda_s r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) - 2Y \frac{v_r}{r} +$$

$$+ 12\eta \left( \frac{v_r}{r} \right)^2 + Q_s z \exp \left( -\frac{E_s}{RT} \right), a(t) < r < b(t), t > 0;$$

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

$$a(0) = a_0; \quad v_r(r, 0) = 0; \quad T(r, 0) = T_0;$$

$$\rho_g(r, 0) = \rho_{g0}; \quad p_g(0) = p_{g0};$$

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

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

$$T(r, t) \Big|_{r=a(t)-0} = T(r, t) \Big|_{r=a(t)+0};$$

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

$$v_r(r, t) \Big|_{r=a(t)-0} = v_r(r, t) \Big|_{r=a(t)+0} = \dot{a}(t),$$

а закон движения границы  $r = a(t)$  поры в рассматриваемом (сильновязком) режиме ее затекания определяется из решения следующей задачи:

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

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

Здесь  $t$  — время;  $r$  — радиус;  $v_r$  — скорость радиального движения;  $T$  — температура;  $p_e$  — амплитуда УВ;  $c$  — удельная теплоемкость;  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности;  $Y$  — предел текучести;  $\eta$  — коэффициент вязкости;  $Q_s$  — тепловой эффект реакции;  $z$  — предэкспоненциальный множитель;  $E_s$  — энергия активации химической реакции;  $R$  — универсальная газовая постоянная;  $\gamma$  — показатель адиабаты газа.

Для представления результатов вычислительных экспериментов использованы определяющие безразмерные параметры

$$\text{Re} = \frac{a_0 \sqrt{p_e \rho_s}}{\eta}; \quad \text{Pr} = \frac{c_s \eta}{\lambda_s}; \quad \beta = \frac{Y}{p_e}; \quad e_{ch} = \frac{RT_0}{E_s};$$

$$s = \frac{c_s \rho_s}{p_e} T_0; \quad q_{ch} = \frac{Q_s z}{\lambda_s} \frac{E_s}{RT_0^2} a_0^2 \exp\left(-\frac{E_s}{RT_0}\right);$$

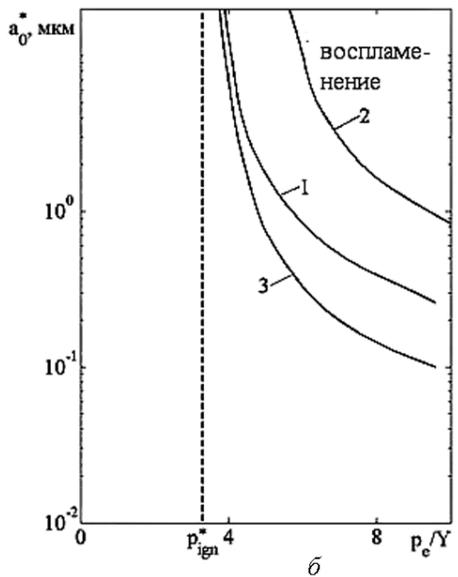
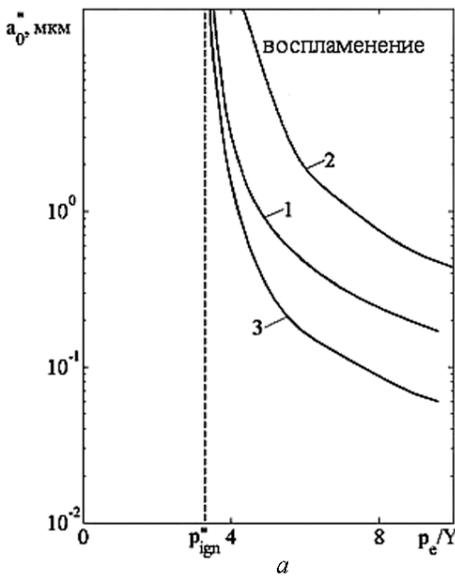
$$\Lambda_g = \frac{\lambda_g}{\lambda_s}; \quad \varepsilon_g = \frac{c_g \rho_g}{c_s \rho_s}; \quad \pi_g = \frac{p_g}{p_e},$$

где  $\text{Re}$  — число Рейнольдса,  $\text{Pr}$  — число Прандтля.

При отсутствии газа в порах параметрический анализ результатов вычислительных экспериментов, устанавливающих влияние определяющих безразмерных параметров изучаемой модели на критические условия ударно-волнового инициирования очаговой химической реакции в пористом ЭМ, проведен в работах [1, 3].

На рисунке частично представлены результаты расчетов, иллюстрирующие зависимость критического радиуса  $a_0^*$  воспламенения ЭМ с начальной пористостью  $\phi_0 = 0,1$  ( $\alpha_0 = 1,11$ ) от безразмерного параметра  $\beta^{-1} = p_e/Y$  при различных значениях коэффициента вязкости (1,2 —  $\eta = 10$  Па·с; 3 —  $\eta = 1$  Па·с) и предела текучести (1,3 —  $Y = 0,2$  ГПа; 2 —  $Y = 0,1$  ГПа). Расчет проведен при  $\text{Re} = 0,1$ ;  $\text{Pr} = 10^4$ ;  $\Lambda_g = 0,1$ ;  $\varepsilon_{g0} = 0,6$ ;  $\pi_{g0} = 10^{-3}$ ;  $\gamma = 1,4$ . Используемые в расчетах данные о теплофизических и термокинетических свойствах ЭМ соответствуют ТНТ и приведены в [3]. Штриховая линия на рисунке определяет пороговое давление  $p_{ign}^*$  инициирования очаговой химической реакции ( $Y = 0,2$  ГПа) [1, 3].

Параметрический анализ результатов вычислительных экспериментов показывает, что в рассматриваемом (сильновязком) режиме



**Влияние коэффициента вязкости и предела текучести на порог инициирования химической реакции пористого ЭМ при отсутствии (а) и наличии (б) газа в порах**

затекания пор межфазный теплообмен не оказывает существенного влияния и на процесс нагрева подвижной границы поры [6], и на критические условия ударно-волнового инициирования очаговой химической реакции в ЭМ. Доминирующими являются мезоскопические процессы тепловой диссипации и теплопереноса, протекающие в твердой фазе ударно-сжатого ЭМ. Представленные теоретические результаты физически правильно отражают существующие представления о влиянии микроструктурного параметра  $a_0$  на порог инициирования химической реакции в пористом ЭМ [1].

*Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта Президента РФ по государственной поддержке ведущих научных школ (грант НШ-255.2012.8).*

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Хасанов Б. А., Аттетков А. В., Борисов А. А. Ударно-волновое инициирование пористых энергетических материалов и вязкопластическая модель горячих точек // Химическая физика. 1996. Т. 15, № 7. С. 53–125.
2. Дунин С. З., Сурков В. В. Динамика закрытия пор во фронте ударной волны // Прикладная математика и механика. 1979. Т. 43, вып. 3. С. 511–518.
3. 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.
4. Ударно-волновые процессы в двухкомпонентных и двухфазных средах / С.П. Киселев, Г.А. Руев, А.П. Трунев и др. Новосибирск: Наука. Сиб. отделение. 1992. 261 с.

5. Аттетков А. В., Головина Е. В., Ермолаев Б. С. Математическое моделирование мезоскопических процессов тепловой диссипации и теплопереноса при наличии расплавленных зон в ударно-сжатом пористом материале // Тепловые процессы в технике. 2010. Т. 2, № 3. С. 129–132.
6. 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. 53–58.
7. Нигматулин Р. И. Динамика многофазных сред / В 2-х частях. М.: Наука, 1987.
8. Нигматулин Р. И., Хабеев Н. С. Теплообмен газового пузырька с жидкостью // Известия АН СССР. Механика жидкости и газа. 1974. № 5. С. 94–100.

Статья поступила в редакцию 05.09.2012