

также не подкреплены экспериментальными исследованиями. Разработка контактных методов термического анализа [7, 8] позволила определить температуры достижимых перегревов ряда полимерных веществ и предельные температуры терморазложения ВВ различных классов, что способствовало расширению представлений о тепловом взрыве рассматриваемых систем и внесению корректив в соответствующие математические модели физики горения и взрыва. Проведенная работа позволяет также считать, что предельная температура терморазложения ВВ имеет большие основания быть использованной для характеристики взрывоопасности ВВ нежели температура вспышки (если  $T_i \neq T_{кип}$ ), ввиду ее простого физического смысла и связи с другими индивидуальными характеристиками ВВ (поверхностным натяжением и изменением объемной свободной энергии Гиббса).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Баум Ф.А., Орленко Л.П., Станюкович К.П. и др. Физика взрыва. — М.: Наука, 1975. — 691 с.
2. Браун М., Доллимор Д., Галвей А. Реакции твердых тел / Пер. с англ. — М.: Мир, 1983. — 360 с.
3. Мюнстер А. Химическая термодинамика / Пер. с нем. — М.: Мир, 1971. — 296 с.
4. Янг Д. Кинетика разложения твердых веществ / Пер. с англ. — М.: Мир, 1969. — 264 с.
5. Скрипов В.П., Сеницын Е.Н., Павлов П.А. и др. Теплофизические свойства жидкостей в метастабильном состоянии. — М.: Атомиздат, 1980. — 208 с.
6. Павлов П.А. Динамика вскипания сильно перегретых жидкостей. — Свердловск: АН СССР, УрО, 1988. — 245 с.
7. Shlensky O.F., Shashkov A.G. and Aksenov L.N. Thermal Decomposition of Materials, ELSEVIER, Amsterdam, 1991, 302 p.
8. Шленский О.Ф., Юндев Д.Н. // Теплофизика высоких температур. — 1993. — Т. 31, № 4. — С. 685—686; 1994. — Т. 32, № 1. — С. 137—139.
9. Боуден Ф., Иоффе Н. Быстрые реакции в твердых веществах / Пер. с англ. — М.: ИЛ, 1962. — 261 с.
10. Андреев К.К., Беляев А.Ф. Теория взрывчатых веществ. — М.: Оборонгиз, 1960. — 594 с.
11. Александров В.В., Буфетов И.Г., Пастухов Т.В., Тухтаев Р.К. // ФГВ. — 1973. — 9, № 1. — С. 75—84.
12. Андреев В.П., Буфетов Н.С. // ФГВ. — 1971. — 7, № 2. — С. 306—308.
13. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела. — М.: Физматгиз, 1963. — 696 с.
14. Шленский О.Ф., Мурашов Г.Г. // Докл. АН СССР. — 1983. — Т. 269, № 6. — С. 1406—1409.
15. Ениколопан Н.С., Александров А.И., Гаспарян Э.Э. и др. // Докл. АН СССР. — 1991. — Т. 319, № 6. — С. 1384—1387.
16. Дубовик А.В., Боболев В.К. Чувствительность жидких взрывчатых систем к удару. — М.: Наука, 1978. — 227 с.
17. Нарисава И. Прочность полимерных материалов / Пер. с яп. — М.: Химия, 1987 г.
18. Шленский О.Ф., Афанасьев Н.В. // ФГВ. — 1984. — № 1. — С. 40—43.

г. Москва, А-47,  
МХТУ им. Д.И. Менделеева

Поступила в редакцию  
16/III 1994,  
после доработки — 20/VI 1994

УДК 536.46

С.Г. Андреев, Л.Н. Власова

### ВЛИЯНИЕ ЦИКЛИЧНОСТИ ВОЗДЕЙСТВИЯ ТЕПЛОГО ПОТОКА НА ЭНЕРГИЮ ЗАЖИГАНИЯ ВВ В КОНДЕНСИРОВАННОЙ ФАЗЕ

Проведенный анализ результатов численных расчетов зажигания ВВ в конденсированной фазе показал возможность значительного уменьшения плотности энергии, необходимой для воспламенения вещества за счет изменения параметров цикличности поверхностного теплового

© С.Г. Андреев, Л.Н. Власова, 1995.

Влияние характеристик циклического теплового источника (а) на энергию зажигания  $Q$  (б).

потока, инициирующего воздействия. Эффект качественно объясняется проявлением предвзрывного разогрева вещества, которым, как правило, пренебрегают при использовании распространенных аналитических методов классической тепловой теории зажигания.

При разработке различных технологических процессов, связанных с тепловым и механическим воздействием на энергетический материал, в том числе с утилизацией взрывных устройств, возникает необходимость анализа начальных стадий взрывных процессов, например зажигания, при условиях, отличающихся от традиционно исследуемых. Значительный интерес представляют воздействия, при которых на поверхностях фрикционного контакта возникают источники зажигания с тепловым потоком, меняющимся периодически таким образом, что фазы высокой интенсивности разделены паузами, во время которых источник тепла практически отсутствует (рисунок, а).

Использование известных аналитических методов тепловой теории зажигания [1, 2], когда пренебрегается химическим тепловыделением, на стадии разогрева, предвещающей момент зажигания, может существенно исказить оценки чувствительности ВВ к нетрадиционным формам механических и тепловых воздействий.

При циклических тепловых воздействиях на поверхность ВВ предвзрывное (или предвоспламенительное) тепловыделение химической реакции в окрестности источника зажигания повышает температуру и уменьшает ее градиенты вблизи поверхности зажигания не только на стадии интенсивного действия источника  $t_{и}$ , но и во время паузы  $t_{п}$ . Саморазогрев вещества, активируемый предыдущими тепловыми импульсами и замедляющий релаксацию прогретого слоя ВВ на стадии нулевой активности внешнего источника энергии, облегчает зажигание под действием последующих внешних тепловых импульсов. Очевидно, что существенное изменение энергии зажигания по отношению к тепловому источнику постоянной интенсивности может наблюдаться при определенных соотношениях параметров циклическости источника зажигания, характерных времен разложения ВВ и тепловой релаксации в окрестности последнего.

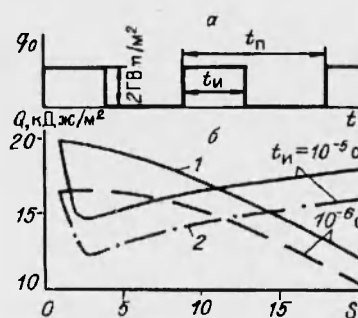
В качестве примера, иллюстрирующего приведенные соображения, можно привести частные результаты решения задачи о зажигании циклическим тепловым источником, возникающим на поверхности фрикционного контакта двух веществ (одно из них — энергетический материал), перемещающихся относительно друг друга с переменной скоростью. Функция удельной мощности тепловыделения (на единицу объема) при термическом разложении к-фазы принята соответствующей уравнению кинетики нулевого порядка

$$\Phi(t) = Q_k z \exp(-E/RT),$$

где  $Q_k$  — тепловой эффект реакции (на единицу объема);  $z$  — предэкспоненциальный множитель;  $E$  — энергия активации;  $R$  — универсальная газовая постоянная;  $T$  — температура к-фазы.

Температурные поля находились из решения сопряженной тепловой задачи:

$$c_1 \rho_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = \lambda_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial r^2}, \quad 0 < r < r_1,$$



$$c_2 \rho_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} = \lambda_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial r^2} + \Phi(T_2), \quad r_1 < r < r_2,$$

$$t = 0: T_1 = T_2 = T_0,$$

$$r = 0: \frac{\partial T_1}{\partial r} = 0,$$

$$r = r_1: \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} - \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} = q_0(t), \quad T_1 = T_2,$$

$$r = r_2: \frac{\partial T_2}{\partial r} = 0.$$

Здесь  $\rho$  — плотность к-фазы;  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности;  $c$  — удельная теплоемкость; индексы: 0 — начальные значения параметров, 1 и 2 — соответствуют двум трущимся материалам.

Закон изменения интенсивности фрикционного источника задается в виде, представленном на рисунке *a*. В частном случае при  $s = t_n/t_u = 1$  задача соответствует случаю зажигания постоянным тепловым потоком. Систему решали в безразмерных переменных по неявной четырехточечной схеме с использованием трехточечной прогонки расчета параметров на каждом временном шаге. Момент зажигания определялся, исходя из условия неограниченного нарастания температуры в граничных точках. Неопределенность такого подхода (с точки зрения точности) не превышает 2—3 шага по времени, что на несколько порядков меньше времени задержки зажигания  $t_3$ . В случае расчета  $t_3$  при  $q_0 = \text{const}$  различие результатов настоящей работы и традиционной теории зажигания [1] лежит в интервале указанной неопределенности.

На рисунке показаны зависимости плотности энергии зажигания  $Q = \int_0^{t_3} q_0(t) dt$  от параметра скважности теплового источника  $s$  для двух веществ:  $\rho_1 = \rho_2 = 1,7 \text{ г/см}^3$ ,  $\lambda_1 = \lambda_2 = 0,1 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ ,  $c_1 = c_2 = 1 \text{ КДж/(кг} \cdot \text{К)}$ . Одно из веществ  $Q_k = 3,82 \text{ ГДж/м}^3$ ,  $z = 3,2 \cdot 10^{15} \text{ 1/с}$ ,  $E = 0,199 \text{ МДж/моль}$  [3] (кривые 1) менее чувствительно по отношению ко второму с  $Q_k = 10 \text{ ГДж/м}$ ,  $z = 3,16 \cdot 10^{18} \text{ 1/с}$ ,  $E = 0,228 \text{ МДж/моль}$  [2] (кривые 2). Задержки зажигания при  $s = 1$  у этих веществ равны соответственно 10 и 8,7 мкс.

Очевидно, что зависимость  $Q$  многопараметрическая и ее выражение через безразмерные комплексы параметров системы является предметом дальнейших исследований.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Аверсон А.Э. Теория зажигания. В сб.: Теплообмен в процессах горения. — Черноголовка, 1980. — С. 16—36.
2. Амосов А.П., Бостанджиян С.А., Козлов В.С. Зажигание твердых ВВ теплотой сухого трения // ФГВ. — 1972. — 8, № 3. — С. 362—368.
3. Аттетков А.В., Лазарев В.В. Разогрев и воспламенение энергетических материалов при сжатии газовой поры // Труды МВТУ. — 1989. — № 530. — С. 3—19.

107005, Москва  
НИИСМ, МГТУ им. Н.Э. Баумана

Поступила в редакцию  
23/III 1994