

тического состава. Горение протекает в автоколебательном режиме. Температура образования Co_2P близка к температуре его плавления, энергия активации процесса составляет 205 кДж/моль.

Поступила в редакцию 21/IV 1982

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. В. Самсонов, Л. Л. Верейкина. Фосфиды. Киев: Изд-во АН УССР, 1961.
2. С. В. Мучник, В. Б. Черногоренко и др. Неорган. материалы, 1979, 15, 608.
3. С. В. Мучник, В. Б. Черногоренко и др.— В кн.: Проблемы технологического горения. Т. 2. Черноголовка, 1981.
4. А. Г. Мержанов. Закономерности и механизм горения пиротехнических смесей титана и бора. Препринт. Черноголовка, 1978.
5. S. Zetzlitzny, J. Scherelew. Z. anorg. Chem., 1909, 63, 245.
6. Н. П. Новиков, И. П. Боровинская, А. Г. Мержанов. Термодинамический анализ реакций самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. Препринт. Черноголовка, 1975.
7. С. Е. Myers. High Temp. Sci., 1976, 6, 309.
8. Г. В. Самсонов, Л. А. Дворина, Б. М. Рудь. Силициды. М.: Металлургия, 1979.
9. У. Д. Верятин, В. П. Маширев и др. Термодинамические свойства неорганических веществ. Справочник. М.: Атомиздат, 1965.
10. Э. И. Максимов, А. Г. Мержанов, В. М. Шкиро. ФГВ, 1965, 1, 4, 24.
11. А. П. Алдушин, Т. М. Мартемьянова и др. ФГВ, 1973, 9, 5, 613.

О ВЛИЯНИИ УСЛОВИЙ ЗАЖИГАНИЯ НА ГОРЕНИЕ ТОПЛИВА

И. Г. Ассовский, З. Г. Закиров, О. И. Лейпунский
(Москва)

Вопрос о влиянии условий зажигания на дальнейшее распространение волны горения представляет большой интерес для теории нестационарного горения топлива. Однако он исследован лишь для горючего газа [1] и безгазовых систем [2, 3], когда горение не сопровождается фазовым переходом вещества и соответствующим изменением кинетики химической реакции. В применении к газифицирующимся системам задача анализировалась в работе [4]. Считалось, что зажигание наступает, когда поверхность топлива нагреется до температуры поверхности конденсированной фазы при горении. Упрощенное представление стадии воспламенения позволило рассмотреть весь процесс в рамках одной модели Я. Б. Зельдовича для нестационарного горения пороха с постоянной температурой поверхности.

В данной работе предлагается формулировка задачи с учетом тепловыделения реакции разложения топлива в процессе нагрева и отличия кинетики термического разложения от кинетики реакции при горении. Распространение волны горения рассматривается в рамках феноменологической модели нестационарного горения, учитывающей изменение температуры поверхности топлива. Исследование процесса проводится численным решением задачи на примере воспламенения топлива потоком горячего газа при постоянном давлении.

В предположениях, принятых в тепловой теории зажигания [5], изменение температуры $T(x, t)$ топлива описывается уравнением теплопроводности с реакцией нулевого порядка

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \rho Q_1 k_{01} \exp(-E_1/RT), \quad x, t \geq 0. \quad (1)$$

Здесь ρ , c , λ — соответственно плотность, теплоемкость и теплопроводность топлива, постоянные по величине; Q_1 , k_{01} , E_1 — удельная теплота, предэкспонент и энергия активации реакции термического разложения; R — газовая постоянная.

Будем считать характерные размеры образца топлива много большими глубины прогрева при зажигании, поэтому

$$T(x \rightarrow \infty, t) = T_0 = T(x, 0), \quad (2)$$

где T_0 — начальная температура топлива. Граничное условие на поверхности $x = 0$ в случае нагрева потоком газа имеет вид

$$\lambda(\partial T/\partial x)|_{x=0} = -\alpha[T_g - T(0, t)], \quad 0 < t \leq t_i, \quad (3)$$

где α — коэффициент теплообмена. После зажигания ($t > t_i$) условие на поверхности изменяется и определяется закономерностями нестационарного горения.

Анализ процесса зажигания топлива при воздействии теплового импульса, проведенный в [6, 7], показал, что моментом зажигания t_i следует считать момент, когда дальнейший разогрев системы происходит даже при отключении внешнего теплоподвода. Отключение внешнего нагрева до момента t_i вызывает падение температуры поверхности ($dT(0, t)/dt < 0$). Если же внешний нагрев отключить после t_i , топливо будет саморазогреваться ($dT(0, t)/dt > 0$). В момент зажигания суммарное тепловыделение в зоне реакции должно превысить теплоотвод из зоны реакции в глубь топлива

$$\left[2\lambda \frac{RT_s^2}{E_1} Q_1 k_{01} \exp\left(-\frac{E_1}{RT_s}\right) \right]^{1/2} \geq \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=x^*}. \quad (4)$$

Здесь $T_s = T(0, t)$ — максимальная температура топлива; x^* — холодная граница зоны химической реакции (в расчетах за x^* принималось расстояние от поверхности пороха, на котором скорость тепловыделения в e раз меньше по сравнению с максимальной при $x = 0$).

Нестационарная скорость распространения волны горения, согласно феноменологической модели Я. Б. Зельдовича — Б. В. Новожилова [8], связана с температурой T_s и градиентом температуры f у поверхности конденсированной фазы топлива (к-фазы) соотношениями

$$u = u^0\left(p, T_s - \frac{\kappa f}{u}\right), \quad T_s = T_s^0\left(p, T_s - \frac{\kappa f}{u}\right), \quad \kappa = \lambda/\rho c, \quad (5)$$

где $u^0(p, T_0)$, $T_s^0(p, T_0)$ — известные стационарные зависимости скорости горения и температуры поверхности от давления p и начальной температуры топлива. В расчетах использовались соотношения (5) в виде

$$u = Bp^\nu \exp\{\hat{p}(T_s - \kappa f/u)\}, \quad u = u_1 \exp(-E_2/2RT_s), \quad (6)$$

где энергия активации E_2 , соответствующая кинетике разложения топлива при горении, может отличаться от энергии активации при термическом разложении E_1 [9].

Изменение во времени T_s , f , u определяется уравнением теплопроводности (в системе координат, связанной с поверхностью к-фазы)

$$\rho c \partial T/\partial t = \lambda \partial^2 T/\partial x^2 + \rho c u \partial T/\partial x, \quad 0 \leq x < \infty, \quad t > t_i \quad (7)$$

с начальным распределением температуры, сформировавшимся в к-фазе к моменту воспламенения $T(x, t = t_i) = T_i(x)$, и условиями (2), (5).

Решение задачи проводилось численным методом по неявной разностной схеме. Поскольку основное изменение температуры происходит в поверхностном слое с характерной шириной x_0 , то с целью получения более точного численного решения использовалось преобразование пространственной координаты [10]

$$y = 1 - \exp(-\xi x/x_0). \quad (8)$$

Здесь ξ — коэффициент преобразования, который выбирается из условий задачи. С учетом преобразования (8) исходная система уравнений имеет вид

$$\partial T/\partial \tau = \gamma^2 \partial^2 T/\partial x^2 + \gamma(w - \xi) \partial T/\partial y + \Psi(T), \quad 0 \leq y \leq 1,$$

$$w = \begin{cases} 0, & \tau \leq \tau_i, \\ a_1 \exp(-a_2/T_s), & \tau > \tau_i, \end{cases}$$

$$\Psi(T) = \begin{cases} a_4 \exp(-a_2/T), & \tau \leq \tau_i, \\ 0, & \tau > \tau_i, \end{cases} \quad (9)$$

$$\frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} = \begin{cases} -a_5 (T_g - T_s)/\xi, & \tau \leq \tau_i, \\ -\frac{\omega}{\xi} \left(T_s + \frac{1}{\beta} \ln \frac{a_5 \rho v}{\omega} \right), & \tau > \tau_i, \end{cases}$$

$$T(0, y) = T_0, \quad T(\tau, 1) = T_0,$$

$$\gamma = \xi(1 - y), \quad a_1 = u_1/u_0, \quad a_2 = E_2/2R,$$

$$a_3 = E_1/R, \quad a_4 = t_0 Q_1 k_{01} \kappa/\lambda, \quad a_5 = \frac{\alpha x_0}{\lambda}, \quad a_6 = \frac{B}{u_0}.$$

Здесь совершен переход к безразмерным переменным с использованием характерных масштабов:

$$x_0 = \max \{ \kappa/u_0^0(p, T_0), \lambda(T^* - T_0)/\alpha(T_g - T_0) \}, \quad t_0 = x_0^2/\kappa, \quad u_0 = x_0/t_0.$$

Особенность задачи (9) состоит в смене характерных масштабов при переходе от зажигания к горению. При этом шаг по времени изменялся, исходя из характерного для горения масштаба времени $t_0 = \kappa/u_i^2$, где u_i — скорость горения, обусловленная давлением и градиентом температуры в к-фазе в момент зажигания.

В расчетах использовались значения параметров, соответствующие нитроцеллюлозному пороху [8, 9, 11]: $\rho = 1,6$ г/см³, $c = 0,35$ кал/(г·град), $\lambda = 5,6 \cdot 10^{-4}$ кал/(см·с·град), $\kappa = 10^{-3}$ см²/с, $E_1 = 35\,800$ кал/моль, $\rho Q_1 k_{01} = 2,5 \cdot 10^{18}$ кал/(см³·с), $E_2 = 19\,800$ кал/моль, $B = 0,0075$ см/с, $u_1 = 1125$ см/с, $\nu = 1$, $\beta = 0,002$ град⁻¹, $T_g = 2000$ К, $T^* = 600$ К.

На рис. 1 приведены зависимости времени задержки зажигания и температуры поверхности пороха в момент зажигания от величины коэффициента теплоотдачи. Уменьшение τ с ростом α существенно зависит от начальной температуры пороха, особенно при малых значениях коэффициента теплоотдачи¹. Увеличение температуры поверхности в момент зажигания с ростом интенсивности нагрева происходит вследствие увеличения градиента температуры в порохе и соответственно теплоотвода из зоны химической реакции. В результате, согласно (4), для зажигания требуется большая температура T_s .

Изменение скорости горения после зажигания в зависимости от коэффициента теплоотдачи показано на рис. 2. При уменьшении теплового потока, подводимого к пороху, увеличивается время задержки зажигания и соответственно толщина прогретого слоя, поэтому превышение скорости горения над ее стационарным значением увеличивается. С ростом коэффициента теплоотдачи в топливе создается распределение температуры, близкое к распределению при стационарном горении для заданного давления. Поэтому существует такое значение α , при котором нестационарная скорость практически не отличается от стационарного значения. При дальнейшем увеличении теплового потока к пороху скорость горения выходит на стационарный режим «снизу» (см. рис. 2, 4). Интенсивный теплоподвод приводит к ускорению зажигания и уменьшению глубины прогретого слоя. В результате прогретый слой быстро выгорает, скорость горения падает (см. рис. 2, 5) и лишь затем постепенно выходит на стационарный режим. При дальнейшем увеличении коэффициента теплоотдачи происходит «пригасание» топлива вскоре после зажигания. Аналогичный характер изменения скорости горения получен в [3] для безгазовых составов при варьировании навески воспламенителя.

С уменьшением начальной температуры при неизменном коэффициенте теплоотдачи растет нестационарная составляющая скорости горения. При этом с уменьшением интенсивности нагрева максимальные значения

¹ При этом кривая температуры поверхности в момент зажигания практически не зависит от начальной температуры.

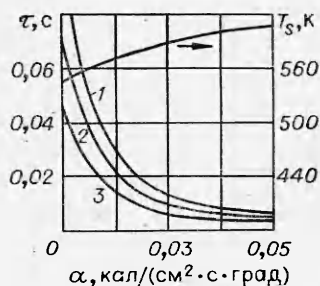


Рис. 1. Зависимость времени задержки зажигания и температуры поверхности в момент зажигания от коэффициента теплоотдачи.

T_0 , К: 1 — 223, 2 — 273, 3 — 323.

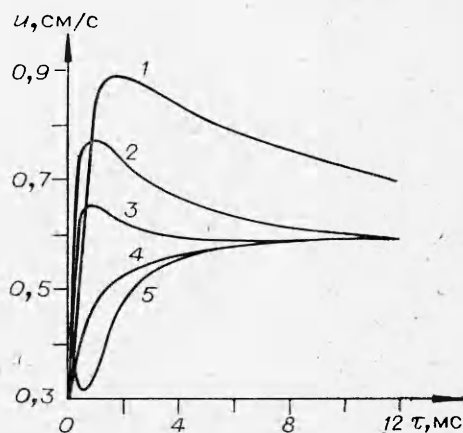


Рис. 2. Нестационарная скорость горения после зажигания; $T_0 = 223$ К, $p = 5$ МПа.

α , кал/(см² · с · град): 1 — 0,01, 2 — 0,03, 3 — 0,05, 4 — 0,08, 5 — 0,1.

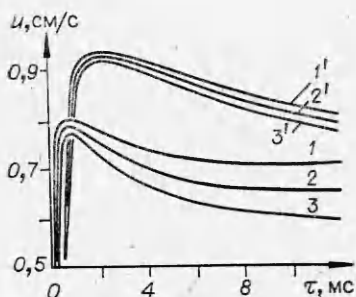


Рис. 3. Влияние начальной температуры на скорость горения после зажигания.

1—3 — $\alpha = 0,03$ кал/(см² · с · град);
1'—3' — $\alpha = 0,005$ кал/(см² · с · град);
1, 1' — $T_0 = 323$ К; 2, 2' — $T_0 = 273$ К;
3, 3' — $T_0 = 223$ К.

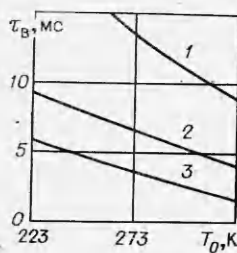


Рис. 4. Время выхода на стационарный режим горения в зависимости от начальной температуры топлива; $p = 5$ МПа.

α , кал/(см² · с · град): 1 — 0,01, 2 — 0,02, 3 — 0,03.

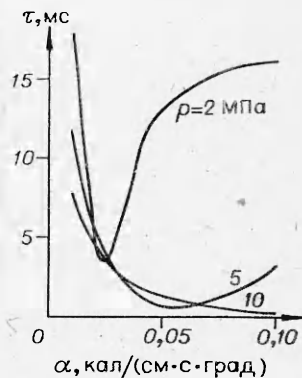


Рис. 5. Влияние коэффициента теплоотдачи и давления газа на время установления стационарного режима горения.

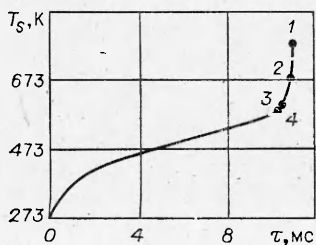


Рис. 6. Изменение температуры поверхности топлива в процессе нагревания; $T_0 = 273$ К, $p = 2$ МПа, $\alpha = 0,03$ кал/(см² · с · град).

k : 1 — 100, 2 — 20, 3 — 2, 4 — 1.

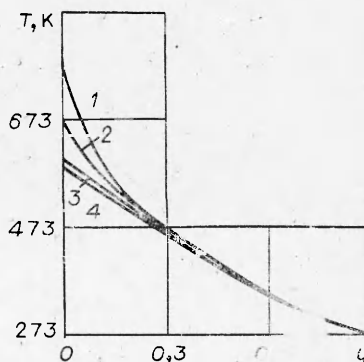


Рис. 7. Распределение температуры в топливе к моменту зажигания; $T_0 = 273$ К, $p = 2$ МПа, $\alpha = 0,03$ кал/(см² · с · град).

k : 1 — 100, 2 — 20, 3 — 2, 4 — 1.

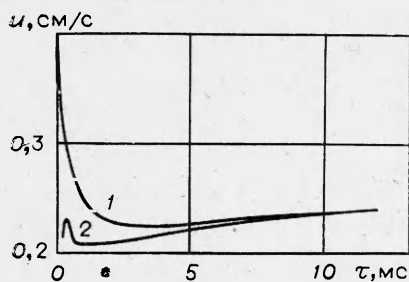


Рис. 8. Скорость нестационарного горения при различных условиях зажигания топлива; $T_0 = 273$ К, $p = 2$ МПа, $\alpha = 0,03$ кал/(см²·с·град).
 k : 1 — 20, 2 — 1.

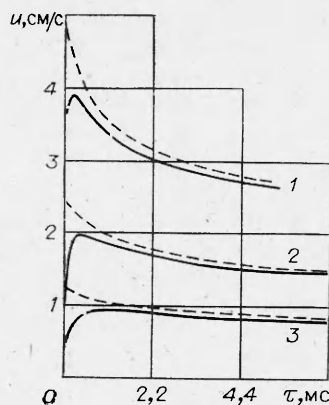


Рис. 9. Нестационарная скорость горения при мгновенном подъеме давления; $T_0 = 293$ К.
 p/p_0 : 1 — 20, 2 — 10, 3 — 5.

скорости горения при различных температурах сближаются (рис. 3). Это связано с тем, что при данных условиях теплообмена температура поверхности в момент зажигания практически не зависит от начальной температуры, но существенно зависит от коэффициента теплоотдачи (см. рис. 1). Поэтому при уменьшении коэффициента теплоотдачи распределение температуры в поверхностных слоях пороха будет все в большей степени определяться условиями нагрева, нежели начальной температурой пороха, и влияние начальной температуры будет сказываться лишь после выгорания поверхностных слоев.

Время выхода на стационарный режим горения почти линейно уменьшается с ростом начальной температуры пороха (рис. 4), причем эта зависимость нелинейно возрастает с уменьшением коэффициента теплоотдачи. Под временем выхода на стационарный режим здесь понимается время от зажигания до момента, когда скорость горения отличается не более чем на 0,1 от своего стационарного значения.

На рис. 5 представлена зависимость времени выхода на стационарный режим горения от коэффициента теплоотдачи при различных давлениях. Характерным для кривых является наличие минимума, более выраженного при давлениях, меньших 5 МПа. С увеличением давления минимум смещается в область больших значений коэффициента теплоотдачи.

Важен при решении задач о зажигании топлива выбор критерия зажигания. К настоящему времени нет единого подхода к определению момента и условия зажигания [5]. Для исследования влияния критерия зажигания на последующее нестационарное горение пороха условие (4) заменено более общим

$$\left[2\lambda \frac{RT_s^2}{E_1} Q_1 k_{01} \exp(-E_1/RT_s) \right]^{1/2} \geq k^{1/2} \lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=x^*} \quad (4')$$

Варьируя константу k , можно получить различные критерии, используемые в литературе [5]. На рис. 6 показано изменение температуры поверхности топлива со временем в процессе нагревания. Точками 1—4 отмечены значения температуры в момент зажигания, получающиеся при различных значениях k в условии (4').

На рис. 7, 8 представлены профили температуры в порохе и кривые изменения скорости нестационарного горения. Выбор условия зажигания (4') может оказать существенное влияние на расчетную величину нестационарной скорости горения.

В заключение отметим, что переход горения от воспламенения к стационарному режиму представляет собой своеобразный частный случай

задачи о переходе горения с одного режима на другой². В работе [12] показано, что, если глубина прогретого слоя к-фазы начального режима много больше конечного, исходное распределение температуры не успевает существенно измениться за время перехода. При этом для скорости нестационарного горения может быть получено аналитическое решение.

На рис. 9 представлен расчет скорости горения в переходном режиме при мгновенном подъеме давления. До момента подъема давления порох горел стационарно при давлении 1 МПа. Штриховыми линиями изображен расчет по «замороженному профилю», предложенный в [12]. С увеличением отношения p_1/p_0 , где p_0 — начальное давление, p_1 — конечное, расчет по «замороженному профилю» все точнее описывает численное решение. Это свидетельствует о возможности в ряде случаев, не решая уравнений нестационарного горения, а используя лишь профиль температуры в порохе, полученный к моменту зажигания, получать достаточно точно решение задачи о горении топлива после зажигания.

Авторы благодарны В. Е. Зарко за полезное обсуждение работы.

Поступила в редакцию 12/III 1982

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Г. Мержанов, Б. И. Хайкин, К. Г. Шкадинский. ПМТФ. 1969, 5.
2. К. Г. Шкадинский. ФГВ, 1974, 7, 3.
3. А. Г. Струнина, Т. М. Мартемьянова и др. ФГВ, 1974, 10, 4.
4. Ю. А. Гостинцев. ФГВ, 1974, 7, 3.
5. A. G. Merzhanov, A. E. Averson. Comb. Flame, 1974, 16, 89.
6. И. Г. Ассовский, А. Г. Истратов, О. И. Лейпунский. Докл. АН СССР, 1978, 299, 3.
7. И. Г. Ассовский, О. И. Лейпунский. ФГВ, 1980, 16, 1.
8. Я. Б. Зельдович, О. И. Лейпунский, В. Б. Либрович. Теория нестационарного горения пороха. М.: Наука, 1975.
9. А. А. Зенин. — В. кн.: Физические процессы при горении и взрыве. М.: Атомиздат, 1980.
10. В. А. Фрост, В. Л. Юмашев. ПМТФ, 1973, 3.
11. В. Е. Зарко. Канд. дис. ИХКиГ СО АН СССР. 1974.
12. И. Г. Ассовский, О. И. Лейпунский. Докл. АН СССР, 1981, 258, 6.
13. О. И. Лейпунский, В. И. Колесников-Свиридов, В. И. Маршаков. Докл. АН СССР, 1964, 154, 4.

ВЛИЯНИЕ ДИАМЕТРА ТЕПЛОПРОВОДЯЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ИХ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИ ГОРЕНИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СИСТЕМ

Н. Н. Бахман, И. Н. Лобанов
(Москва)

Скорость горения u газовых и конденсированных систем возрастает при увеличении теплового потока q из зоны реакции к свежей смеси. В рамках теории горения Зельдовича для гомогенных систем

$$u \sim \sqrt{\lambda}, \quad (1)$$

где λ — коэффициент теплопроводности среды на границе зоны реакции со стороны свежей смеси.

Величина q и скорость горения могут быть увеличены за счет введения в систему теплопроводящих элементов (ТЭ), например медных или серебряных проволочек. Экспериментально такая возможность подтверждена при горении конденсированных систем, горящих за счет собственного окислителя [1—4], а также при диффузионном горении жидкостей [5] и пленок полимеров [6]. Экспериментальные данные, касающиеся

² Так, ускоренное сгорание поверхностного слоя топлива при неинтенсивном зажигании (см. рис. 2, 3) аналогично эффекту ускоренного горения при быстром подъеме давления, предсказанному теорией Я. Б. Зельдовича [8] и экспериментально доказанному в работе [13].