

УДК 536.46

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ПРИПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ КОНДЕНСИРОВАННОГО ВЕЩЕСТВА НА ЕГО ЗАЖИГАНИЕ МОЩНЫМ ИМПУЛЬСОМ ИЗЛУЧЕНИЯ

Р. С. Буркина, А. М. Домуховский

Томский государственный университет, 634050 Томск, roza@ftf.tsu.ru

Предложена модель зажигания реакционноспособного конденсированного вещества мощным импульсом излучения из высокотемпературной области через переходный слой, образующийся у поверхности вещества. Проведено численное исследование процесса в зависимости от параметров переходного слоя при различных длительностях импульса излучения. Проанализированы закономерности роста переходного слоя, характер изменения температурного поля в веществе и переходном слое, определены предельные режимы зажигания.

Ключевые слова: импульс излучения, переходный слой, зажигание конденсированного вещества.

Мощный поток излучения ($\approx 10^9$ Вт/м²), падающий на конденсированное вещество, может вызывать сложные структурные изменения его приповерхностного слоя. Возможны разрушение и растрескивание приповерхностного слоя, возникновение эрозионного потока с поверхности вещества, плавление легкоплавкого компонента в пористой многокомпонентной структуре, изменение пористости и газопроницаемости, зарождение и развитие внутри вещества высокотемпературных очагов [1, 2]. Отмеченные структурные изменения вещества приводят к качественно новым закономерностям его инициирования и горения по сравнению с тепловым воздействием умеренной интенсивности ($\approx 10^6$ Вт/м²). Так, в работе [3] было показано, что только математическая модель, учитывающая присутствие переходного слоя у поверхности вещества, позволяет воспроизвести наблюдаемые в эксперименте закономерности зажигания конденсированного вещества электровзрывом.

В данной работе изучаются закономерности разрушения приповерхностного слоя конденсированного реакционноспособного вещества (КРВ), образование переходного слоя, его влияние на зажигание КРВ при действии на поверхность вещества мощного импульса излучения из высокотемпературной области (области плазмы), которая может образовываться

в веществе, например, при электрическом разряде или электровзрыве находящегося в нем проводника [4]. Схема процесса показана на рис. 1. Высокотемпературная область моделируется плоским слоем, находящимся внутри КРВ. Импульс теплового излучения из высокотемпературной полости воздействует на поверхность КРВ, приводит к ее частичному разрушению, образованию продуктами разрушения переходного слоя между высокотемпературной полостью и веществом, разогреву и при достаточной энергии импульса излучения — к зажиганию КРВ. В отличие от исследований [4–7], в данной работе переходный слой между высокотемпературной полостью и веществом формируется в ходе процесса. Основная цель работы заключается в нахождении параметров образующегося переходного слоя, оказывающих основное влияние на режимы и па-

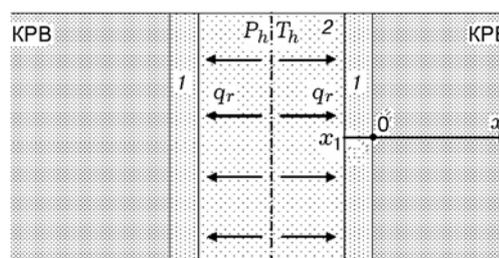


Рис. 1. Схема процесса:

1 — переходный слой, 2 — высокотемпературная полость, КРВ — конденсированное реакционноспособное вещество, P_h , T_h — давление и температура в высокотемпературной полости

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 11-03-00136-а).

© Буркина Р. С., Домуховский А. М., 2012.

раметры зажигания КРВ. При этом в данной работе параметры высокотемпературной полости и импульса излучения из нее не определяются, как, например, в [4–7], а задаются.

Рассматривается модель непрозрачного конденсированного вещества и полупрозрачного образующегося переходного слоя. Первоначально поток излучения из высокотемпературной полости поглощается поверхностью КРВ. Тепло по веществу передается теплопроводностью. Полагается, что при достижении поверхностью КРВ температуры разрушения T_{ph} происходит ее разрушение и продукты разрушения образуют переходный слой. Этот процесс рассматривается как эндотермический. Вещество переходного слоя состоит из образующихся частиц разрушенного КРВ и газа. Причем переходный слой находится в условиях сильного сжатия ввиду высокого давления высокотемпературной полости. Поэтому в модели полагается, что плотность вещества переходного слоя пропорциональна давлению в высокотемпературной полости. Образующийся переходный слой занимает место разрушенного вещества и движется в сторону высокотемпературной полости. В модели не учитывается возможное частичное перемешивание вещества переходного слоя с веществом высокотемпературной полости. Не учитывается также возможный турбулентный тепло- и массообмен между высокотемпературной полостью и переходным слоем. Прогрев образующегося переходного слоя происходит за счет теплопроводности и в результате поглощения потока излучения из высокотемпературной полости по закону Бугера. Теплообмен на границе между высокотемпературной полостью и переходным слоем задается по закону Ньютона. Между переходным слоем и конденсированным веществом имеет место идеальный тепловой контакт. С целью упрощения модели полагается, что в КРВ проходит химический процесс, описываемый глобальной кинетикой и аррениусовской зависимостью скорости от температуры. Продукты химического процесса твердые.

Математическая постановка задачи в подвижной системе координат, с началом на поверхности вещества и движущейся вместе с ней, имеет вид:

в области КРВ, $\tau > 0$, $0 < \xi < \infty$:

$$\frac{\partial \Theta}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \Theta}{\partial \xi^2} + V_0 \frac{\partial \Theta}{\partial \xi} +$$

$$+ (1 - \eta)^n \exp \frac{\Theta}{1 + Ar\Theta}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial \tau} = V_0 \frac{\partial \eta}{\partial \xi} + Td(1 - \eta)^n \exp \frac{\Theta}{1 + Ar\Theta}, \quad (2)$$

в области переходного слоя, $\tau > 0$, $\xi_1(\tau) < \xi < 0$:

$$\rho_{d1} \frac{\partial \Theta_1}{\partial \tau} = \frac{K_\lambda}{K_c} \frac{\partial^2 \Theta_1}{\partial \xi^2} + \rho_{d1}(V_0 - V) \frac{\partial \Theta_1}{\partial \xi} + \frac{q_d(\tau)K_\mu}{K_c} \exp[-K_\mu(\xi - \xi_1)], \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho_{d1}}{\partial \tau} + \frac{\partial[\rho_{d1}(V - V_0)]}{\partial \xi} = 0, \quad (4)$$

$$\rho_{d1} = k_{dp}P, \quad (5)$$

$$q_d(\tau) = \begin{cases} q_{dr}, & \tau \leq \tau_r, \\ 0, & \tau > \tau_r. \end{cases} \quad (6)$$

Начальное условие:

$$\Theta(\xi, 0) = -\Theta_0, \quad \eta(\xi, 0) = 0, \quad \xi_1(0) = 0. \quad (7)$$

Граничные условия:

на границе между высокотемпературной полостью и переходным слоем ($\xi = \xi_1$)

$$\frac{d\xi_1}{d\tau} = V(\xi_1, \tau) - V_0(\tau), \quad (8)$$

$$\frac{\partial \Theta_1(\xi_1, \tau)}{\partial \xi} = Bi_1(\Theta_1(\xi_1, \tau) - \Theta_h),$$

в глубине вещества ($\xi \rightarrow \infty$)

$$\Theta(\infty, \tau) = -\Theta_0, \quad \eta(\infty, \tau) = 0, \quad (9)$$

на границе между КРВ и высокотемпературной полостью, когда переходного слоя нет ($\xi_1 = 0$),

$$\frac{\partial \Theta(0, \tau)}{\partial \xi} = -K_f q_d(\tau) - Bi(\Theta_h - \Theta(0, \tau)), \quad (10)$$

на границе между КРВ и переходным слоем ($\xi_1 < 0$)

$$\Theta(0, \tau) = \Theta_1(0, \tau), \quad (11)$$

$$\frac{\partial \Theta(0, \tau)}{\partial \xi} + \left[\left(\frac{1}{Ar} + \Theta(0, \tau) \right) (1 - K_c) - N_{ph} \right] \times \\ \times V_0(\tau) = K_\lambda \frac{\partial \Theta(0, \tau)}{\partial \xi} - q_d \exp[K_\mu \xi_1(\tau)], \quad (12)$$

$$V(0, \tau) = \left[1 - \frac{1}{\rho_{d1}(0, \tau)} \right] V_0(\tau). \quad (13)$$

Безразмерные переменные и параметры:

$$\Theta = \frac{E(T - T_m)}{RT_m^2}, \quad \Theta_1 = \frac{E(T_1 - T_m)}{RT_m^2},$$

$$\eta = \frac{a_b - a}{a_b} \rho_{d1} = \frac{\rho_1}{\rho}, \quad V = \frac{v}{v_m}, \quad V_0 = \frac{v_0}{v_m},$$

$$q_d = \frac{q}{q_m}, \quad P = \frac{p_h}{p_m}, \quad \tau = \frac{t}{t_m},$$

$$\xi = \frac{x}{x_m}, \quad \tau_r = \frac{t_r}{t_m}, \quad \xi_1 = \frac{x_1}{x_m},$$

$$q_{dr} = \frac{q_r}{q_m}, \quad t_m = \frac{RT_m^2 c \rho}{EQz\rho^n a_0^n \exp(-E/RT_m)},$$

$$x_m = \sqrt{\frac{\lambda t_m}{c \rho}}, \quad v_m = \frac{x_m}{t_m}, \quad q_m = \frac{\lambda RT_m^2}{x_m E (1 - f_1)},$$

$$p_m = \frac{\rho RT_m}{M}, \quad k_{dp} = \frac{k_p RT_m}{M},$$

$$T_m = \frac{1}{3} \left(T_b + \frac{Qa_0}{c} \right), \quad Bi = \frac{\alpha x_m}{\lambda}, \quad Bi_1 = \frac{\alpha_1 x_m}{\lambda_1},$$

$$K_\lambda = \frac{\lambda_1}{\lambda}, \quad K_c = \frac{c_1}{c}, \quad K_\mu = \mu_1 x_m, \quad K_f = \frac{1 - f}{1 - f_1},$$

$$N_{ph} = \frac{EL}{cRT_m^2}, \quad Ar = \frac{RT_m}{E}, \quad Td = \frac{cRT_m^2}{EQa_0},$$

$$\Theta_0 = \frac{E(T_m - T_b)}{RT_m^2}.$$

Здесь использованы следующие размерные переменные: T — температура, a — относительная концентрация горючего компонента, v , v_0 — скорости движения вещества переходного слоя и поверхности КРВ, ρ — плотность, x — пространственная координата, t — время, c — удельная теплоемкость, λ — теплопроводность, α — коэффициент теплоотдачи, μ_1 —

коэффициент поглощения в законе Бугера, E — энергия активации, Q — тепловой эффект химического процесса, z — предэкспонент, n — порядок реакции, R — универсальная газовая постоянная, q — плотность мощности потока излучения, p — давление, k_p — коэффициент, связывающий плотность вещества переходного слоя и давление полости, M — молярная масса вещества, L — теплота разрушения вещества (фазового перехода), f , f_1 — коэффициенты отражения потока излучения на поверхности КРВ и переходного слоя, x_1 — ширина переходного слоя, q_r , t_r — плотность мощности и длительность импульса излучения из высокотемпературной полости, $v_0(\tau)$ — скорость перемещения поверхности КРВ, которая находилась из температурного профиля КРВ по точке достижения температуры фазового перехода $\Theta_{ph} = E(T_{ph} - T_*)/(RT_*^2)$. Индексами 1, h , b и m отмечены соответственно параметры переходного слоя, высокотемпературной полости, начального состояния КРВ и масштабы.

Задача (1)–(13) интегрировалась численно по неявной разностной схеме с использованием четырехточечного шаблона. Для решения разностных уравнений теплопроводности использовался метод прогонки. Уравнения кинетики и неразрывности решались сквозным счетом. За время зажигания принимался момент достижения в какой-либо точке КРВ выгорания $\eta = 0.99$, сопровождаемый резким ростом температуры в окрестности этой точки, после которого по КРВ распространялась волна горения. Для расчета выбраны счетные параметры, при изменении которых время зажигания менялось менее чем на 1 %.

Исследовалось модельное вещество с теплофизическими и кинетическими параметрами, как у гидразина и его замещенных.

Размерные параметры КРВ взяты из [8–10]:

$\rho = 1003$ кг/м³, $c = 4190$ Дж/(кг·К), $\lambda = 0.58$ Дж/(с·м·К), $M = 0.03205$ кг/моль, $n = 1$, $Q = 4.1 \cdot 10^7$ Дж/кг, $E = 1.59 \cdot 10^5$ Дж/моль, $z = 10^{13}$ с⁻¹, $a_b = 0.25$, $L = 2.256 \cdot 10^6$ Дж/кг, $\alpha = 0, 580$ Вт/(м²·К).

Размерные параметры переходного слоя выбраны в соответствии с [6]:

$c_1 = 1610, 2415, 2950$ Дж/(кг·К); $\lambda_1 = 0.034$ Дж/(с·м·К); $\mu_1 = 4 \cdot 10^3, 1.1 \cdot 10^5, 1.3 \cdot 10^6$ м⁻¹; $k_p = 1.93 \cdot 10^{-6}$ кг/Дж; $\alpha_1 = 0$ и 580 Вт/(м²·К).

Параметры воздействия высокотемпературной области:

$$q_r = 1.43 \cdot 10^9 \text{ Вт/м}^2, p_h = 2 \cdot 10^8 \text{ Па}, T_h = 15\,000 \text{ К}.$$

Длительность импульса излучения t_r изменялась в широких пределах. Температура разрушения КРВ $T_{ph} = 1200, 2000, 2800 \text{ К}$. Начальная температура вещества $T_b = 293 \text{ К}$. Отражение потока лучистой энергии от поверхностей КРВ и переходного слоя не учитывалось, т. е. $f = f_1 = 0$.

Пересчет на безразмерные параметры дает значения: $\Theta_0 = 14.2$; $Ar = 0.0478$; $Td = 0.0178$; $\Theta_{ph} = 6.68, 24.92, 43.27$; $N_{ph} = 12.35$; $K_\lambda = 0.0586$; $K_f = 1.0$; $K_c = 0.384, 0.576, 0.704$; $k_{dp} = 0.457$; $Bi = 0$ и $0.552 \cdot 10^{-3}$; $Bi_1 = 0$ и $0.942 \cdot 10^{-2}$; $K_\mu = 0.221 \cdot 10^{-2}, 0.0607, 0.718$; $P = 0.84$; $q_{dr} = 31.1$; $\Theta_h = 323$.

Таким образом, в расчетах менялись теплоемкость и прозрачность переходного слоя, а также температура разрушения КРВ. Длительность импульса излучения изменялась в широком диапазоне с целью определения режимов процесса инициирования. В расчетах определяли температурные поля, глубину превращения, скорость разрушения поверхности КРВ, ширину разрушенного и переходного слоев. Результаты численного исследования показали существование различных режимов процесса зажигания КРВ при формировании переходного слоя в зависимости от температуры фазового перехода, теплоемкости переходного слоя и длительности импульса излучения.

При средних значениях температуры фазового перехода $\Theta_{ph} = 24.92$ и теплоемкости переходного слоя $K_c = 0.576$ в зависимости от длительности импульса излучения возможны три режима процесса, представленные на рис. 2–6. При достаточной длительности импульса наблюдается устойчивое зажигание (рис. 2, 3). В ходе прогрева температура КРВ повышается и происходит воспламенение (рис. 2, кривая 2). При этом температура у поверхности КРВ достигает значения температуры разрушения поверхности и образуется переходный слой. Далее устанавливается устойчивое горение при температуре поверхности КРВ, равной температуре фазового перехода. На рис. 3,а показано поведение температуры поверхности КРВ, на рис. 3,б — изменение длины переходного слоя $\xi_1(\tau)$, которая находится по формуле (8), и длины разрушенного припо-

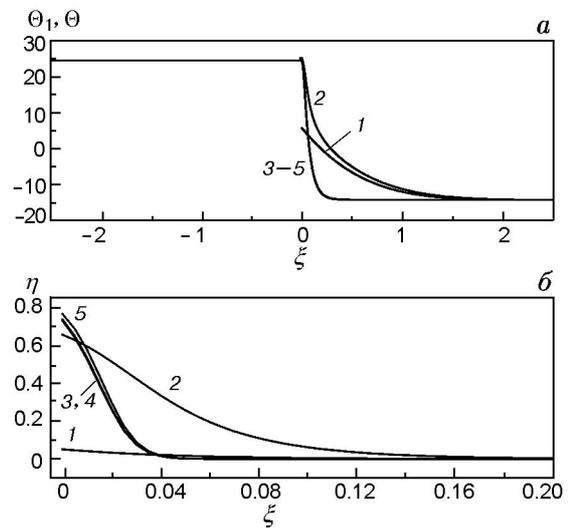


Рис. 2. Профили температуры в КРВ ($\xi > 0$) и переходном слое ($\xi < 0$) (а) и профили глубины превращения в КРВ (б) при $\tau_r = 0.358$: $\Theta_{ph} = 24.92$, $K_c = 0.576$, $K_\mu = 0.00221$, $Bi = 0$, $Bi_1 = 0$, $\tau_{ign} = 0.356$; τ : 1 — 0.3, 2 — 0.356, 3 — 0.45, 4 — 0.5, 5 — 1.0

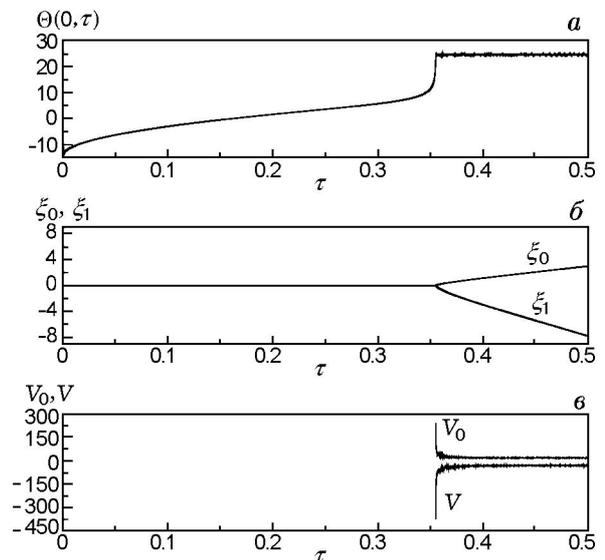


Рис. 3. Изменение температуры поверхности КРВ (а), длин переходного и разрушенного приповерхностного слоев КРВ (б), скоростей перемещения поверхности КРВ и вещества переходного слоя (в) при $\tau_r = 0.358$:

$$\Theta_{ph} = 24.92, K_c = 0.576, K_\mu = 0.00221, Bi = 0, Bi_1 = 0$$

верхностного слоя КРВ $\xi_0 = \int_0^\tau V_0 d\tau$, вещество

которого перешло в переходный слой. Поскольку в высокотемпературной полости давление не изменяется, постоянной остается и плотность вещества переходного слоя, скорость его продвижения также не меняется по длине. Изменение скоростей движения поверхности КРВ V_0 и вещества переходного слоя V во времени показаны на рис. 3, в. В момент образования переходного слоя модули их значений максимальны, а при установлении горения эти скорости выходят на стационарные значения.

При уменьшении длительности импульса излучения τ_r зажигание становится неустойчивым. Соответствующее изменение параметров процесса представлено на рис. 4, 5. В этом случае зажигание происходит после окончания действия импульса излучения длительностью $\tau_r = 0.353 < \tau_{ign} = 0.356$ (τ_{ign} — время зажигания). Спустя некоторый промежуток времени горение прекращается. Скорости движения поверхности и вещества переходного слоя становятся нулевыми, а температура поверхности КРВ монотонно понижается.

При дальнейшем сокращении длительности импульса излучения из разрядной полости уменьшается поступление тепла в КРВ. Его разогрев также уменьшается, и зажигание не происходит. Соответствующее поведение температуры в КРВ, температуры поверхности и глубины превращения показано на рис. 6.

При увеличении теплоемкости переходного слоя до $K_c = 0.704$ зажигание устойчиво при достаточно больших значениях τ_r и отсутствует при малых τ_r . В этих режимах процесс проходит аналогично рассмотренным выше. Режим неустойчивого зажигания не наблюдается при $K_c = 0.704$.

Изменение коэффициента поглощения переходного слоя K_μ (его прозрачности для потока излучения) не отражается на режимах и характеристиках зажигания. Также практически не влияет на зажигание изменение параметра Bi , поскольку основное тепловое воздействие высокотемпературной области на КРВ осуществляется в результате излучения.

Качественное влияние на процесс оказывает температура фазового перехода Θ_{ph} . При достаточно больших ее значениях ($\Theta_{ph} = 43.27$), превышающих температуру горения, при воспламенении КРВ образуется переходный слой.

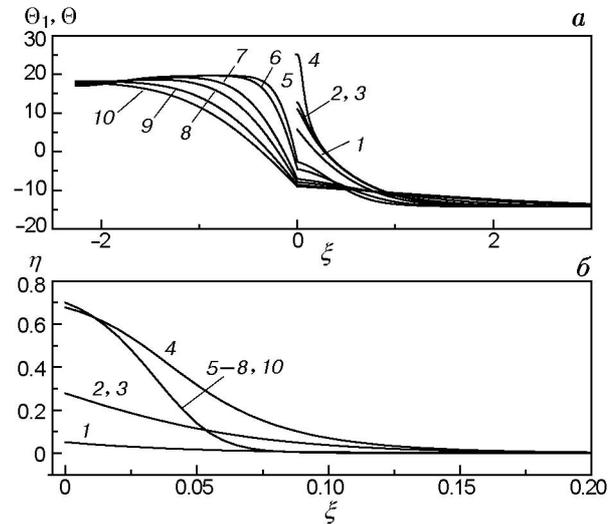


Рис. 4. Профили температуры в КРВ ($\xi > 0$) и переходном слое ($\xi < 0$) (а) и профили глубины превращения в КРВ (б) при $\tau_r = 0.353$: $\Theta_{ph} = 24.92$, $K_c = 0.576$, $K_\mu = 0.00221$, $Bi = 0$, $Bi_1 = 0$, $\tau_{ign} = 0.356$; τ : 1 — 0.3, 2 — 0.349, 3 — 0.352, 4 — 0.356, 5 — 0.45, 6 — 0.5, 7 — 0.75, 8 — 1.0, 9 — 1.5, 10 — 2.0

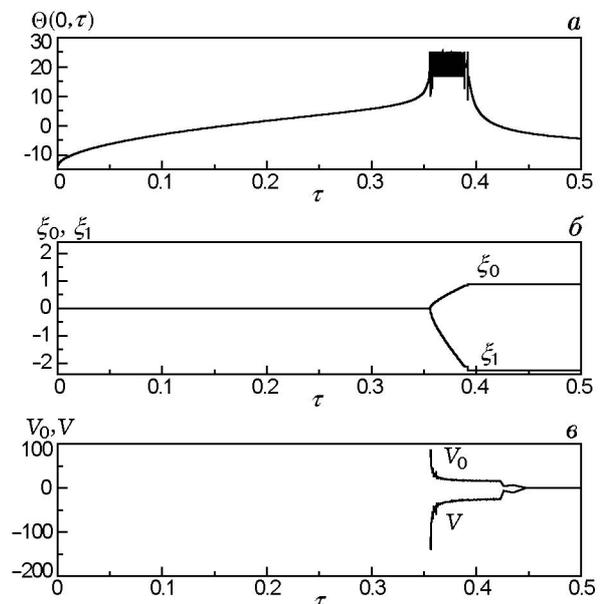


Рис. 5. Изменение температуры поверхности КРВ (а), длин переходного и разрушенного приповерхностного слоев КРВ (б), скоростей перемещения поверхности КРВ и вещества переходного слоя (в) при $\tau_r = 0.353$:

$\Theta_{ph} = 24.92$, $K_c = 0.576$, $K_\mu = 0.00221$, $Bi = 0$, $Bi_1 = 0$

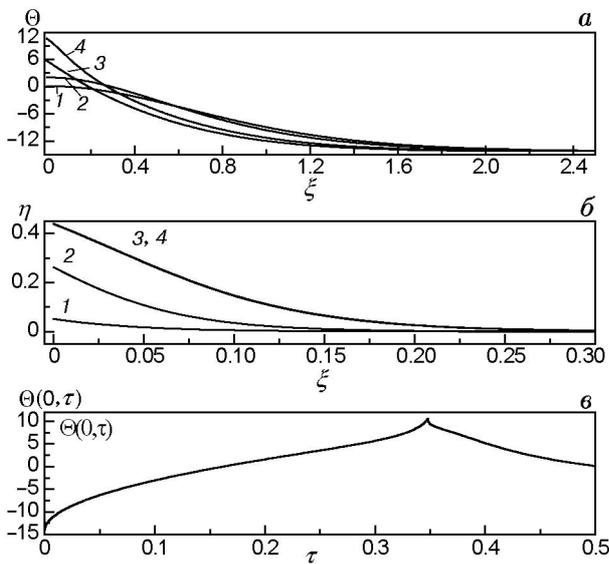


Рис. 6. Профили температуры в КРВ ($\xi > 0$) (а), глубины превращения в КРВ (б) и изменение температуры поверхности КРВ (в) при $\tau_r = 0.348$:

$\Theta_{ph} = 24.92$, $K_c = 0.576$, $K_\mu = 0.00221$, $Bi = 0$, $Bi_1 = 0$; τ : 1 — 0.3, 2 — 0.348, 3 — 0.45, 4 — 0.5

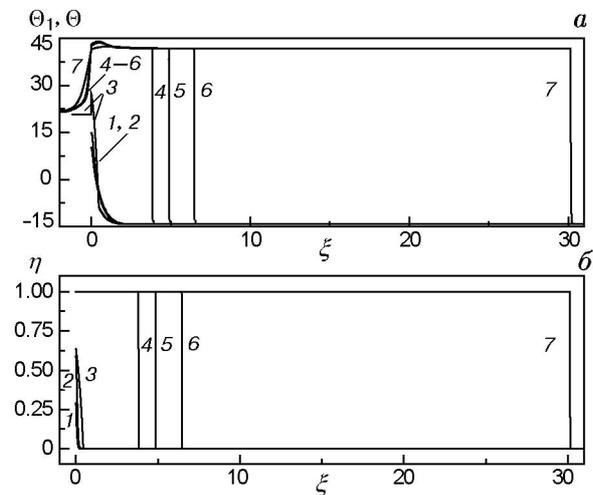


Рис. 7. Профили температуры в КРВ ($\xi > 0$) и переходном слое ($\xi < 0$) (а) и профили глубины превращения в КРВ (б) при $\Theta_{ph} = 43.27$:

$K_c = 0.704$, $K_\mu = 0.00221$, $Bi = 0$, $Bi_1 = 0$, $\tau_r = 0.349$, $\tau_{ign} = 0.381$; τ : 1 — 0.3, 2 — 0.375, 3 — 0.381, 4 — 0.45, 5 — 0.47, 6 — 0.5, 7 — 1.0

Однако далее рост переходного слоя прекращается, скорости движения поверхности КРВ и вещества переходного слоя становятся нулевыми. Волна горения движется по КРВ. Соответствующее поведение характеристик процес-

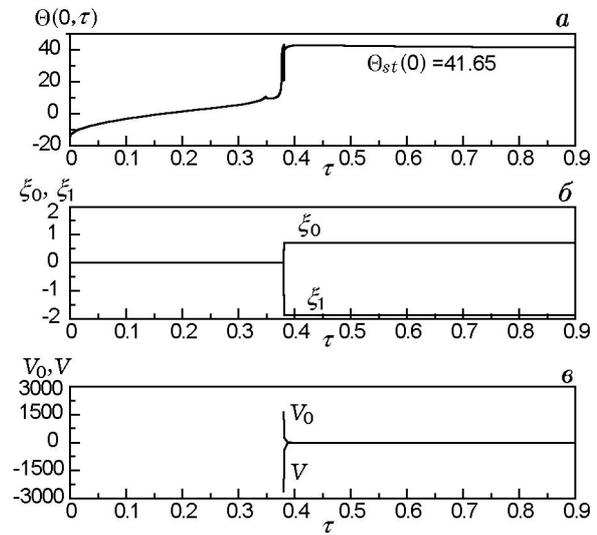


Рис. 8. Изменение температуры поверхности КРВ (а), длин переходного и разрушенного приповерхностного слоев КРВ (б), скоростей перемещения поверхности КРВ и вещества переходного слоя (в) при $\Theta_{ph} = 43.27$:

$K_c = 0.704$, $K_\mu = 0.00221$, $Bi = 0$, $Bi_1 = 0$, $\tau_r = 0.349$

са при $\Theta_{ph} = 43.27$, $K_c = 0.704$, $K_\mu = 0.00221$, $Bi = 0$, $Bi_1 = 0$, $\tau_r = 0.349$ показано на рис. 7, 8. В данном случае стационарное горение происходит при температуре поверхности $\Theta_{st}(0) = 41.65$.

При низких температурах фазового перехода ($\Theta_{ph} = 6.68$) зажигание не наблюдается даже при длительных импульсах излучения. При таких значениях Θ_{ph} в результате прогрева КРВ потоком лучистой энергии температура поверхности достигает значения Θ_{ph} и образуется переходный слой. Далее, пока действует импульс излучения, толщина переходного слоя увеличивается. Температура и глубина превращения в КРВ остаются невысокими. Наибольшие значения $\eta \approx 0.1$ достигаются у поверхности. По окончании импульса излучения увеличение переходного слоя прекращается, и температура в КРВ и переходном слое за счет теплопередачи в глубь вещества монотонно понижается. На рис. 9 показаны профили температуры в переходном слое и КРВ, а также профиль глубины превращения в КРВ после окончания импульса излучения. Изменения температуры поверхности КРВ, длин переходного и разрушенного слоев КРВ иллюстрирует рис. 10 ($\tau_0 = 0.316$ — время образования переходного слоя).

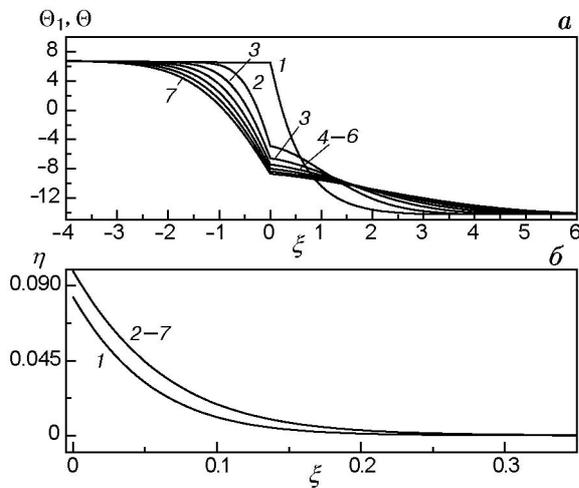


Рис. 9. Профили температуры в КРВ ($\xi > 0$) и переходном слое ($\xi < 0$) (а) и профили глубины превращения в КРВ (б) при $\Theta_{ph} = 6.58$: $K_c = 0.576$, $K_\mu = 0.00221$, $Bi = 0$, $Bi_1 = 0$, $\tau_r = 12.00$; τ : 1 — 12.0, 2 — 12.5, 3 — 13.0, 4 — 13.5, 5 — 14.0, 6 — 14.5, 7 — 15.0

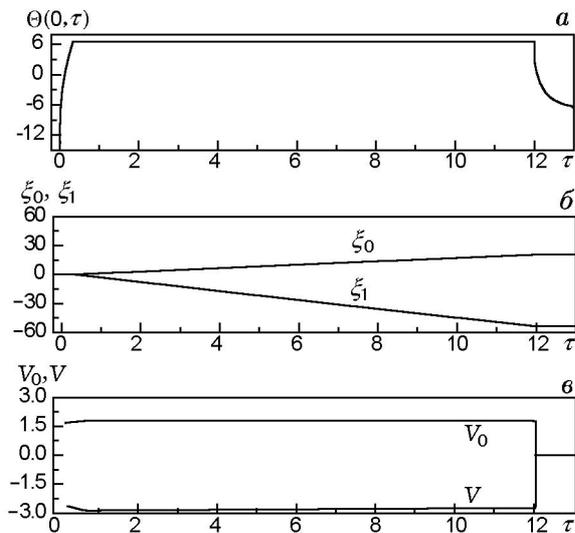


Рис. 10. Изменение температуры поверхности КРВ (а), длин переходного и разрушенного приповерхностного слоев КРВ (б), скоростей перемещения поверхности КРВ и вещества переходного слоя (в) при $\Theta_{ph} = 6.58$: $K_c = 0.576$, $K_\mu = 0.00221$, $Bi = 0$, $Bi_1 = 0$, $\tau_r = 12$

Анализ результатов численного решения показал, что при достаточно высоких температурах фазового перехода Θ_{ph} и фиксированной плотности мощности потока излучения q_{dr} существует критическое время излучения τ_r^* , ниже которого зажигание не происходит. Зависимости времени зажигания τ_{ign} от длительности

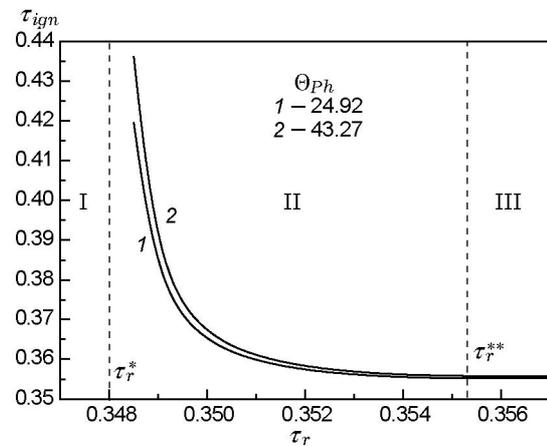


Рис. 11. Зависимость времени зажигания от времени излучения:

$K_c = 0.576$, 0.704 , $K_\mu = 0.00221$, $Bi = 0$, $Bi_1 = 0$

импульса излучения показаны на рис. 11. При длительных импульсах излучения ($\tau_r > \tau_{ign}$) время зажигания не зависит от длительности импульса. При приближении времени излучения к критическому значению τ_r^* время зажигания возрастает. На рис. 11 выделены три области: I — зажигание не происходит, II — имеет место неустойчивое зажигание при невысоких значениях теплоемкости переходного слоя и температуры фазового перехода ($\Theta_{ph} = 24.92$, $K_c = 0.576$), III — область устойчивого зажигания. Граница по времени между областями II и III τ_r^{**} равна времени зажигания при длительных импульсах излучения. При $\Theta_{ph} = 43.27$ неустойчивое зажигание отсутствует.

ВЫВОДЫ

1. Предложена модель зажигания КРВ мощным импульсом излучения через образующийся переходный слой.

2. Исследовано влияние параметров переходного слоя и температуры разрушения на режимы зажигания при различных длительностях импульса излучения.

3. В зависимости от длительности импульса излучения наблюдаются следующие режимы процесса: при высокой температуре разрушения — устойчивое зажигание ($\tau_r > \tau_r^*$) и его отсутствие ($\tau_r \leq \tau_r^*$); при низкой температуре разрушения — неустойчивый процесс образования переходного слоя ($\tau_r > \tau_r^*$) и его отсутствие ($\tau_r < \tau_r^*$), в обоих случаях зажигание не наблюдается; при средней температу-

ре разрушения ($\Theta_{ph} = 24.92$) — устойчивое зажигание ($\tau_r \geq \tau_r^{**}$), неустойчивое зажигание ($\tau_r^* \leq \tau_r < \tau_r^{**}$), отсутствие зажигания и образования переходного слоя ($\tau_r < \tau_r^*$).

4. Увеличение теплоемкости переходного слоя при средней температуре разрушения приводит к исчезновению режимов неустойчивого зажигания.

В дальнейшем разработанная модель может быть использована для исследования и нахождения параметров зажигания конкретных КРВ, сопровождающегося разрушением приповерхностного слоя, при действии мощного импульса излучения из высокотемпературной области, как, например, при электрическом разряде.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ершов А. П., Куперштох А. Л. Исследование канальной стадии подводного электрического разряда // Нестационарные проблемы гидродинамики. — Новосибирск: Ин-т гидродинамики СО АН СССР, 1980. — С. 54–60.
2. Медведев В. В. Экранирование в эрозийном факеле при воздействии лазерного излучения на двухосновной порох // Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики: сб. материалов конф. — Томск: ТГУ, 2008. — С. 151–152.
3. Буркина Р. С., Буркин В. В. Исследование механизмов теплового инициирования конденсированного реакционноспособного вещества электрическим разрядом // Горение и плазмохимия. — 2005. — Т. 3, № 3. — С. 227–234.
4. Буркин В. В., Буркина Р. С. Сравнение параметров зажигания конденсированных зарядов термохимическим и электроплазменным воздействиями // Хим. физика и мезоскопия. — 2006. — Т. 8, № 1. — С. 104–113.
5. Буркин В. В., Буркина Р. С., Тимохин А. М. Особенности гидродинамического воздействия электровзрыва на зажигание конденсированных веществ // Физика горения и взрыва. — 2007. — Т. 43, № 1. — С. 15–22.
6. Буркин В. В., Буркина Р. С., Домуховский А. М. Моделирование теплового инициирования конденсированных реакционноспособных веществ электроразрядной плазмой // Изв. вузов. Физика. — 2007. — № 9. — Приложение. — С. 282–285.
7. Буркин В. В., Буркина Р. С., Домуховский А. М. Анализ условий минимизации энергии разряда при электроплазменном инициировании конденсированных реакционноспособных веществ // Хим. физика и мезоскопия. — 2009. — Т. 11, № 1. — С. 14–21.
8. Андреев К. К. Термическое разложение и горение взрывчатых веществ. — М.: Наука, 1966.
9. Греков А. П., Веселов В. Я. Физическая химия гидразина. — Киев: Наук. думка, 1979.
10. Кухлинг Х. Справочник по физике. — М.: Мир, 1982.

*Поступила в редакцию 14/X 2011 г.,
в окончательном варианте — 1/XII 2011 г.*