

## ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЕ ЗАЖИГАНИЕ РЕАКЦИОННОСПОСОБНОГО ВЕЩЕСТВА ГОРЯЧЕЙ ИНЕРТНОЙ ЧАСТИЦЕЙ С КОНЕЧНЫМ ЗАПАСОМ ТЕПЛА

Р. С. Буркина, Е. А. Микова

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

Численно исследован процесс инициирования реакционноспособного вещества инертной частицей с высокой начальной температурой и ограниченным запасом тепла. Проанализированы возможности использования известных критериев зажигания для изучения данного процесса. Исследовано влияние выгорания на высокотемпературное зажигание при ограниченном запасе тепла поджигающей частицы. Определены четыре режима процесса и критические параметры, разделяющие эти режимы.

Ключевые слова: реакционноспособное вещество, горячая частица, выгорание, критерий зажигания, режимы высокотемпературного зажигания, критические параметры.

Изучение процессов инициирования реакционноспособных веществ (РВ) горячим инертным включением связано с решением вопросов пожаровзрывобезопасности различных технологических процессов и чувствительности веществ к внешним нетепловым воздействиям. Например, взрывоопасные ситуации могут возникнуть при сварке в результате попадания раскаленных частиц в находящееся вблизи вещество, способное к взрывчатому превращению. Локальные очаги разогрева возникают при поглощении излучения оптическими неоднородностями, находящимися в прозрачном для излучения РВ, или при адиабатическом сжатии газовых включений при ударе [1].

Теоретическое исследование тепловой части проблемы сводится к решению задачи зажигания РВ находящимся в нем горячим телом с конечным запасом тепла. В [2–7] численно исследовалось зажигание РВ горячими инертными телами разной формы. В [2] рассмотрен случай зажигания горячей инертной пластиной с низкой теплопроводностью. В результате приближенного теоретического решения и численно были определены критические условия (предельная ширина пластины) и параметры зажигания при незначительном влиянии выгорания РВ. В [3] рассмотрен противоположный предельный случай зажигания РВ горячим высокотеплопроводным инертным телом симметричной формы. Исследованы низко-

температурный и высокотемпературный режимы зажигания, а также сопряженный теплообмен между горячим инертным телом и РВ. Получены аппроксимационные формулы, определяющие критический размер частицы, разделяющий режимы зажигания РВ и постепенного охлаждения инертного тела. В [4, 5] задача зажигания горячей инертной частицей симметричной формы исследовалась при учете распределения температуры в частице. Был определен критический размер частицы и влияние на него распределения температуры в инертной частице. В [5] дополнительно исследовался режим теплообмена между инертной частицей и РВ, а также гетерогенные химические реакции на поверхности инертной частицы. В [6, 7] в рамках модели, учитывающей двумерный теплоперенос в окрестности зоны контакта частицы с веществом, выполнен численный анализ процесса зажигания конденсированного вещества нагретой до высоких температур частицей. В работе [8] методом асимптотического анализа определены критические условия зажигания вещества телом с конечным запасом тепла. В приведенных работах выгорание РВ либо не учитывалось [4, 6–8], либо исследование выполнялось в ограниченном диапазоне изменения параметров системы [2, 3, 5]. В то же время при высокотемпературном зажигании, как показано в [9] на примере задачи зажигания горячей стенкой, выгорание РВ вблизи горячей поверхности может приводить к изменению режимов процесса инициирования, при этом возникает необходимость в дополнитель-

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 06-03-32336а).

ном определении условия зажигания. В случае высокотемпературного зажигания горячим инертным телом с конечным запасом тепла выгорание РВ может существенно влиять как на режимы инициирования, так и на критические параметры системы.

Целью данной работы является анализ режимов зажигания РВ горячим инертным телом, исследование влияния выгорания на характер и пределы процесса зажигания.

Рассматривается неограниченное реакционноспособное вещество (твердое или жидкое), внутри которого находится горячая инертная частица сферической формы. Частица и РВ находятся в идеальном тепловом контакте. Тепло от горячей частицы передается в РВ и распространяется в нем по механизму теплопроводности. Экзотермический химический процесс в РВ подчиняется кинетической функции простой реакции  $m$ -го порядка с зависимостью скорости от температуры по закону Аррениуса. Также полагается, что теплопроводность  $\lambda_1$  инертной частицы высокая, а радиальный размер  $r_1$  небольшой, т. е.  $r_1^2 c_1 \rho_1 \ll \lambda_1 t_{ch}$ , где  $c_1$  и  $\rho_1$  — удельная теплоемкость и плотность инертной частицы,  $t_{ch}$  — характерное время инициирования химического процесса. В результате градиенты температуры по частице будут незначительными, и при описании процесса можно использовать среднюю температуру инертной частицы. При высокотемпературном воздействии частицы на РВ возможно протекание параллельных процессов: фазовые переходы в частице и в веществе, изменение теплофизических параметров вещества при нагреве и др. Поскольку в данной работе исследуется влияние выгорания горючего компонента вещества на процесс зажигания, для упрощения постановки задачи и выделения основного фактора в модели полагается, что продукты химической реакции остаются конденсированными (жидкими или твердыми) с постоянными теплофизическими свойствами, как и у исходного вещества, а фазовые переходы отсутствуют. В постановке задачи также учитывается диффузия горючего компонента вещества, поскольку в общем случае это явление имеет место в конденсированном веществе, хотя коэффициент диффузии для конденсированных сред мал по сравнению с диффузией в газе.

При таких допущениях математическая постановка задачи зажигания РВ горячей инертной частицей в сферической системе ко-

ординат (с началом в центре частицы) в безразмерных переменных имеет вид [10]:

$$\frac{\partial \Theta}{\partial \tau} = \frac{1}{(d + \xi)^2} \frac{\partial}{\partial \xi} \left[ (d + \xi)^2 \frac{\partial \Theta}{\partial \xi} \right] + (1 - \eta)^m \exp \left( \frac{\Theta}{1 + \text{Ar}\Theta} \right); \quad (1)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial \tau} = \frac{\text{Le}}{(d + \xi)^2} \frac{\partial}{\partial \xi} \left[ (d + \xi)^2 \frac{\partial \eta}{\partial \xi} \right] + \text{Td}(1 - \eta)^m \exp \left( \frac{\Theta}{1 + \text{Ar}\Theta} \right); \quad (2)$$

$$\tau, \xi > 0;$$

$$K_{cp} \frac{d}{3} \frac{\partial \Theta_1}{\partial \tau} = \frac{\partial \Theta(0, \tau)}{\partial \xi}; \quad (3)$$

$$\Theta_1(0) = 0, \quad \Theta(\xi, 0) = -\Theta_h, \quad \eta(\xi, 0) = 0; \quad (4)$$

$$\Theta(0, \tau) = \Theta_1(\tau), \quad \frac{\partial \eta(0, \tau)}{\partial \xi} = 0; \quad (5)$$

$$\frac{\partial \Theta(\infty, \tau)}{\partial \xi} = \frac{\partial \eta(\infty, \tau)}{\partial \xi} = 0. \quad (6)$$

Здесь использованы следующие безразмерные переменные и параметры:

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

$$\eta = \frac{a_0 - a}{a_0}, \quad \tau = \frac{t}{t_{ch}}, \quad \xi = \frac{r - r_1}{x_{ch}},$$

$$\text{Td} = \frac{cRT_h^2}{EQa_0}, \quad \text{Ar} = \frac{RT_h}{E}, \quad d = \frac{r_1}{x_{ch}},$$

$$K_{cp} = \frac{c_1 \rho_1}{c\rho}, \quad \text{Le} = \frac{Dc\rho}{\lambda}; \quad \Theta_h = \frac{E}{RT_h^2} (T_h - T_b),$$

$$t_{ch} = \frac{cRT_h^2}{EQz\rho^{m-1}a_0^m} \exp \left( \frac{E}{RT_h} \right), \quad x_{ch} = \sqrt{\frac{\lambda}{c\rho}} t_{ch},$$

где  $T$  — температура;  $T_h$  и  $T_b$  — начальные температуры горячей частицы и РВ;  $a_0$  — начальная относительная концентрация горючего компонента РВ;  $a$  — относительная концентрация горючего компонента РВ;  $E$  — энергия активации;  $R$  — универсальная газовая постоянная;  $t$  — время;  $r$  — радиальная координата;

$r_1$  — радиус частицы;  $c$  — удельная теплоемкость;  $\rho$  — плотность;  $D$  — коэффициент диффузии;  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности;  $Q$  — тепловой эффект реакции;  $z$  — предэкспонент. Индексом 1 отмечены параметры инертной частицы.

Численное интегрирование задачи (1)–(6) проводилось по неявной разностной схеме методом прогонки в диапазонах параметров  $\Theta_h \in [10, 16]$ ,  $Td \in [0, 0.07]$ ,  $Ag = 0.053, 0.054$ ,  $m = 1$ ,  $Le = 0.045$ ,  $K_{cp} = 1.036$ . Безразмерный радиус частицы  $d$  варьировался в широком диапазоне. В исследовании выбраны типичные значения безразмерных параметров для реакционноспособных конденсированных сред. Используемые малые значения параметров  $Ag$  и  $Le$ , как показало исследование, не влияют на качественные характеристики процесса и незначительно меняют их по сравнению со случаем  $Ag = 0$  и  $Le = 0$ . Пространственный шаг и число Куранта выбирались такими, чтобы обеспечивалась точность расчета по параметрам процесса не хуже 1 %.

Первоначально была исследована возможность использования критерия зажигания при иницировании РВ горячим телом высокой температуры с конечным запасом тепла. Известны четыре критерия, определяющие момент зажигания. По первому критерию Я. Б. Зельдовича [11] момент зажигания определялся по времени установления нулевого градиента на горячей поверхности частицы. В [12] момент зажигания определялся по установлению равенства теплоприходов от внешнего источника и от химического процесса с учетом обрезания скорости химической реакции при начальной температуре РВ (второй критерий). В работах [2, 10, 13] момент зажигания определялся по резкому росту температуры и выгорания в какой-либо точке РВ (третий критерий). В случае зажигания РВ горячим телом с конечным запасом тепла в [3, 5] для определения момента зажигания использовалось условие равенства нулю производной по времени от температуры поверхности горячего тела. Это условие соответствовало качественному изменению поведения температуры горячей поверхности: после первоначального понижения в результате передачи тепла в РВ температура поверхности инертного тела начинает расти за счет тепла химических реакций в РВ. Но, как было показано в [3, 9], при высокотемпературных режимах зажигания последний четвертый критерий

неприемлем, так как вблизи горячей поверхности частицы реакционное вещество сразу выгорает при контакте. Поскольку в данной работе исследуются режимы с выгоранием реагента, последний критерий в соответствии с выводом [3] далее не использовался.

На рис. 1 номерами I, II, III отмечены профили температуры (рис. 1, *a*), глубины превращения (рис. 1, *b*) в РВ и точки на кривой температуры поверхности частицы  $\Theta_1(\tau)$  (рис. 1, *b*) в моменты времени, когда выполняется соответствующий критерий зажигания. Видно быстрое выполнение второго критерия, хотя далее идет понижение температуры горячего тела и температуры РВ вблизи горячего тела. Глубина превращения при этом незначительна (т. е. процесс зажигания еще не происходит). При малых запасах тепла второй критерий может выполняться, хотя зажигание при этом не происходит. Первый критерий дает значение времени, более близкое к моменту, определяемому третьим критерием. Однако вблизи критических условий первый критерий выполняется за счет потоков тепла из области воспламенения к поверхности частицы, причем он может выполняться уже после возникновения максимума температуры в глубине вещества, т. е. после зажигания [13, 14]. Выполненный анализ показывает корректность использования третьего критерия. Поэтому далее в исследовании за время зажигания принимался момент резкого роста температуры и выгорания в какой-либо области РВ. Зажигание считалось устойчивым, если после него по РВ распространялась волна горения.

Анализ результатов численного интегрирования задачи (1)–(6) показал, что при достаточно высокой исходной температуре частицы и заметном выгорании реагента вблизи нее (это определяется значениями параметра температурного напора  $\Theta_h$  и критерия Тодеса  $Td$ ) в зависимости от запаса тепла в горячей частице возможны четыре различных режима процесса. При фиксированном значении  $\Theta_h$  исходный запас тепла в горячей частице определяется ее безразмерным радиусом  $d$ . Его изменение при прочих фиксированных параметрах системы приводит к смене режимов высокотемпературного зажигания.

Протекание процесса высокотемпературного зажигания с большим запасом тепла в частице размером  $d \geq d_1^*$  представлен на рис. 2. После первоначального незначительного пони-

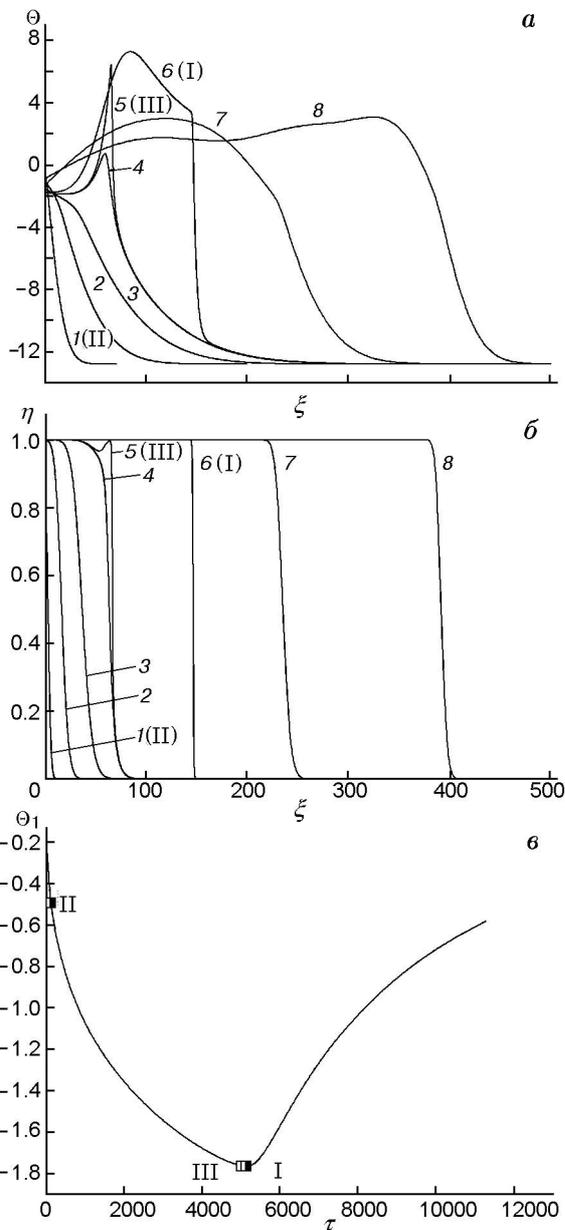


Рис. 1. Изменение температуры (а) и глубины превращения (б) реакционноспособного вещества и температуры частицы во времени (в) в режиме устойчивого зажигания с одной вспышкой:  
 $\tau$ : 1 — 110, 2 — 1000, 3 — 3000, 4 — 5000, 5 — 5007, 6 — 5130, 7 — 7000, 8 — 9000;  $\Theta_h = 12.80$ ,  $Ar = 0.054$ ,  $Td = 0.066$ ,  $d = 670$

жения температуры частицы (рис. 2, в) происходит быстрое воспламенение РВ (соответствующие профили температуры и выгорания определяются кривыми 2 на рис. 2, а, б). Поскольку прогретый слой, достаточный для рас-

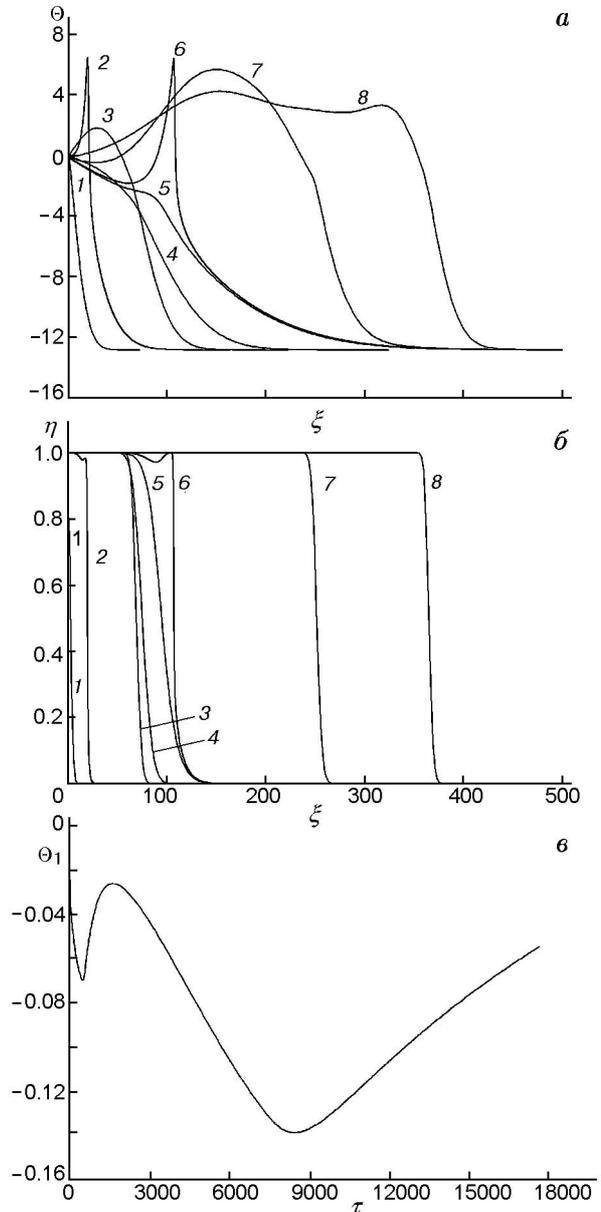


Рис. 2. Изменение температуры (а) и глубины превращения (б) реакционноспособного вещества и температуры частицы во времени (в) в режиме двойной вспышки:  
 $\tau$ : 1 — 100, 2 — 524, 3 — 1000, 4 — 2000, 5 — 7000, 6 — 7257, 7 — 8000, 8 — 9000;  $\Theta_h = 12.80$ ,  $Ar = 0.054$ ,  $Td = 0.066$ ,  $d = 7000$

пространения пламени, еще не создан, после выгорания реагента вблизи частицы горение прекращается. Далее температура частицы понижается, и идет прогрев РВ теплом частицы и горячей области, где прошел химический процесс (профили температуры 3, 4 на рис. 2, а). Через промежуток времени, значи-

тельно превышающий время первого воспламенения, происходит повторная вспышка уже вдали от поверхности частицы (соответствующие кривые 6 для температуры и выгорания на рис. 2, *a, б*), после которой по РВ распространяется волна горения (кривые 7, 8 на рис. 2, *a, б*). Этот режим высокотемпературного зажигания характеризуется двумя вспышками: первая дает неустойчивое зажигание, повторная приводит к устойчивому зажиганию (режим I).

С уменьшением размера частицы первоначальное снижение температуры частицы более существенно, в результате чего увеличиваются время первоначальной вспышки и размер прогретого слоя. При  $d_2^* \leq d < d_1^*$  прогретый слой в РВ к моменту первой вспышки достигает таких размеров, что при поддержке оставшимся запасом тепла в горячей частице горение не прекращается. По РВ распространяется волна горения. Изменения температуры и выгорания в этом режиме устойчивого зажигания с одной вспышкой (режим II) аналогичны представленным на рис. 1.

При меньших размерах частицы ( $d_3^* \leq d < d_2^*$ ) начало развития процесса такое же, как и в режиме II (рис. 3). Но запаса тепла в частице после первоначального понижения ее температуры уже недостаточно для поддержания горения и создания прогретого слоя вдали от поверхности частицы, где химический процесс еще не прошел. Поэтому горение РВ после первой вспышки и выгорания прогретого слоя прекращается, а повторная вспышка не происходит. После повышения температуры частицы за счет тепла химического процесса она монотонно охлаждается (рис. 3, *б*), снижается температура РВ вблизи частицы (кривые 3–7, рис. 3, *a*). Таким образом, этот режим представляет неустойчивое зажигание (режим III).

При дальнейшем уменьшении запаса тепла в частице ( $d_4^* \leq d < d_3^*$ ) ее первоначальное охлаждение значительно и быстрого воспламенения не происходит, хотя наблюдается некоторое выгорание реагента вблизи поверхности частицы (см. рис. 1). При этом за счет тепла, отводимого от частицы, в РВ создается прогретый слой. Воспламенение РВ происходит значительно позже, чем в режиме III, и после зажигания (кривые 5 на рис. 1, *a, б*) по РВ распространяется волна горения. Этот режим представляет собой устойчивое зажигание с одной вспышкой (режим II). Причем при одних и тех же параметрах  $\Theta_h$  и  $T_d$  время устойчивого

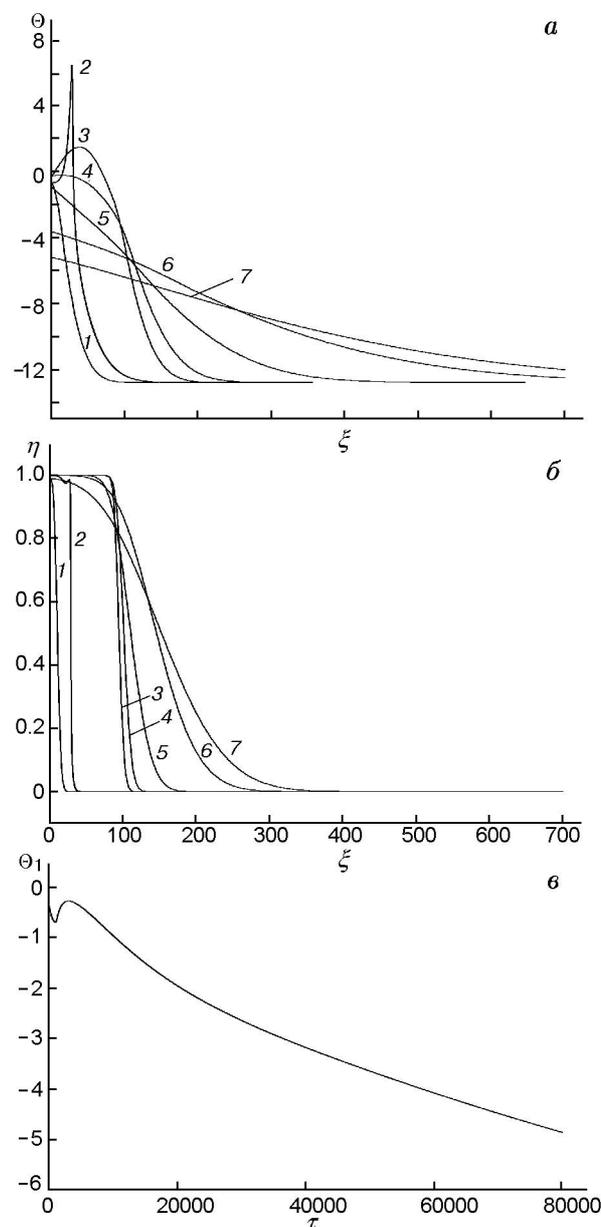


Рис. 3. Изменение температуры (*a*) и глубины превращения (*б*) реакционноспособного вещества и температуры частицы во времени (*в*) при неустойчивом зажигании:

$\tau$ : 1 — 500, 2 — 1118, 3 — 2000, 4 — 3000, 5 — 10000, 6 — 50000, 7 — 90000;  $\Theta_h = 12.80$ ,  $\text{Ar} = 0.054$ ,  $T_d = 0.066$ ,  $d = 950$

зажигания в этом режиме ( $\tau_i = 5007$ ) меньше, чем в режиме I при большем радиусе частицы ( $\tau_i = 7257$ ). Это связано с тем, что устойчивое воспламенение во втором режиме происходит значительно ближе к поверхности частицы, чем в первом режиме. В режиме I время

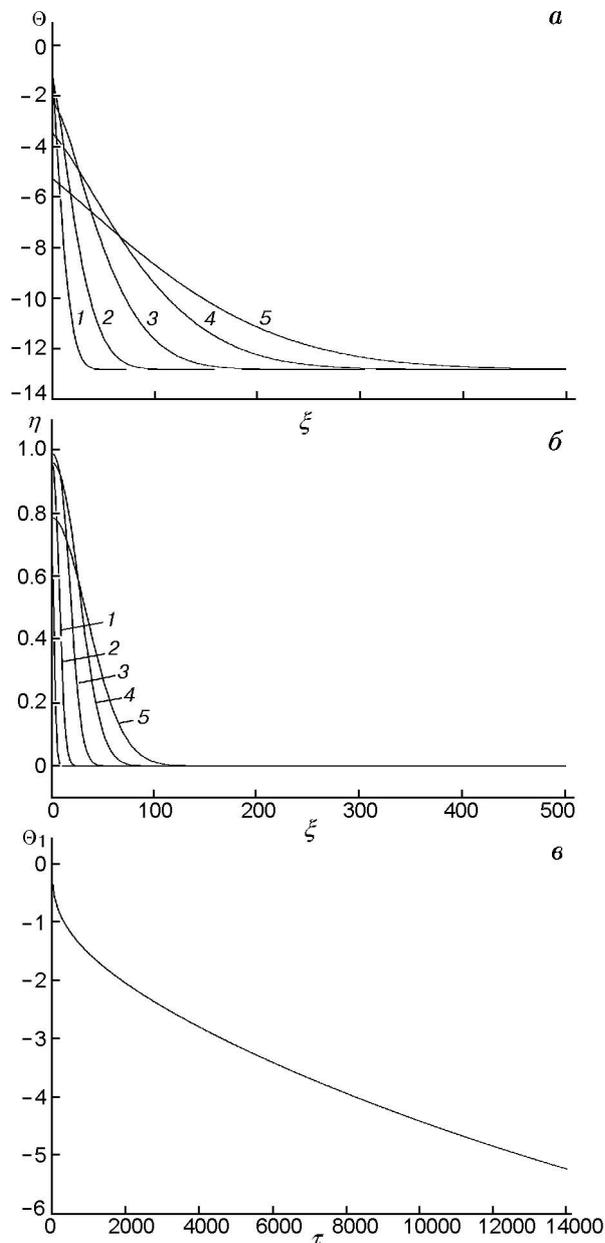


Рис. 4. Изменение температуры (а) и глубины превращения (б) реакционноспособного вещества и температуры частицы (в) во времени при отсутствии воспламенения:

$\tau$ : 1 — 500, 2 — 1 000, 3 — 3 000, 4 — 5 000, 5 — 14 000;  $\Theta_h = 12.80$ ,  $Ar = 0.054$ ,  $Td = 0.066$ ,  $d = 500$

устойчивого зажигания тратится на создание прогретого слоя.

При  $d < d_4^*$  воспламенения РВ не происходит, так как запаса тепла в частице недостаточно для соответствующего повышения температуры РВ вблизи частицы. Температура РВ вблизи горячей частицы вначале повыша-

ется, но в дальнейшем понижается за счет отдачи тепла в глубь РВ (рис. 4,а). Температура самой частицы монотонно падает во времени (рис. 4,в). Глубина превращения вблизи РВ первоначально увеличивается за счет химического процесса, а затем уменьшается из-за диффузии горючего компонента (рис. 4,б). Таким образом, данный режим процесса характеризуется отсутствием воспламенения РВ и монотонным охлаждением частицы (режим IV). Критическое значение  $d_4^*$  при  $Td \rightarrow 0$  согласуется с критическим условием зажигания горячей инертной частицей с конечным запасом тепла, разделяющим режим зажигания РВ от режима охлаждения частицы, полученным в [4] без учета выгорания.

Проведенный анализ результатов численного исследования задачи показал возможность существования четырех критических радиусов частицы  $d_1^* > d_2^* > d_3^* > d_4^*$ , которые разделяют различные режимы процесса. Существование режимов I и III связано с неустойчивостью высокотемпературного зажигания, вызванной выгоранием РВ на начальной стадии процесса, когда прогретый слой, необходимый для распространения волны горения по веществу, еще не создан. Поэтому критические размеры частицы, определяющие границы этих режимов, существенно зависят как от температурного напора частицы  $\Theta_h$ , так и от параметра Тодеса  $Td$ , определяющего выгорание РВ.

При уменьшении параметра  $Td$  при фиксированном  $\Theta_h$  выгорание и его влияние на процесс уменьшаются. При этом  $d_1^*$  резко возрастает (стремится к бесконечности),  $d_4^*$  уменьшается, а  $d_2^*$  и  $d_3^*$  сближаются ( $d_2^*$  убывает, а  $d_3^*$  возрастает). В результате зажигание проходит так же, как в индукционном процессе [4, 6]: реализуются лишь режимы II и IV, а режимы I и III исчезают. Области существования различных режимов процесса в области параметров ( $Td, d$ ) при  $\Theta_h = 12.95$ ,  $Ar = 0.053$  показаны на рис. 5. С возрастанием  $Td$  выгорание РВ увеличивается, что приводит к возрастанию  $d_2^*$  до  $d_1^*$  и убыванию  $d_3^*$  до  $d_4^*$ , при этом значения  $d_1^*$  и  $d_4^*$  изменяются незначительно. В результате увеличиваются области режима III (неустойчивого зажигания с одной вспышкой) и режима IV (отсутствия воспламенения), а область устойчивого зажигания с одной вспышкой (режим II) исчезает (рис. 5).

Если уменьшается  $\Theta_h$  при фиксированном значении параметра  $Td$  (для одной и той же си-

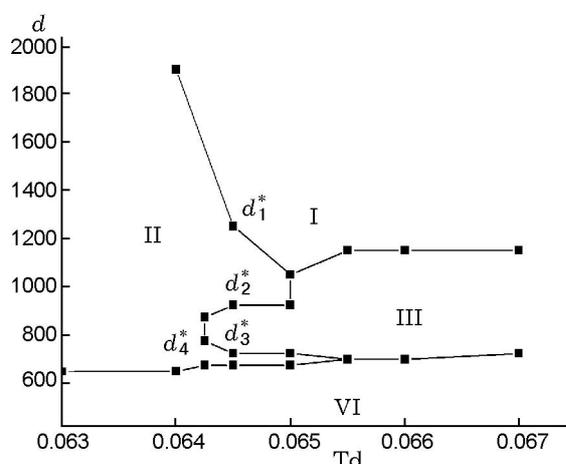


Рис. 5. Области различных режимов высокотемпературного зажигания в зависимости от параметра Тодеса  $Td$  и размера частицы  $d$ :

I — устойчивое зажигание с двойной вспышкой, II — устойчивое зажигание с одной вспышкой, III — неустойчивое зажигание, IV — зажигание отсутствует;  $\Theta_h = 12.95$ ,  $Ar = 0.053$

стемы это возможно лишь в результате увеличения начальной температуры РВ), процесс зажигания облегчается и повышается его устойчивость. При этом критическое значение  $d_1^*$  резко возрастает,  $d_4^*$  убывает, а  $d_2^*$  и  $d_3^*$  сближаются, что приводит к возможной реализации только режимов II и IV.

## ВЫВОДЫ

- Проведено исследование высокотемпературного зажигания реакционноспособного вещества горячей частицей с учетом выгорания реагента. Проанализирована возможность использования критерия зажигания при инициировании РВ инертной частицей высокой температуры.

- В зависимости от запаса тепла в частице возможны четыре режима протекания процесса: устойчивое зажигание с двойной вспышкой ( $d \geq d_1^*$ ), неустойчивое зажигание ( $d_2^* \leq d < d_3^*$ ), устойчивое зажигание с одной вспышкой ( $d_2^* \leq d < d_1^*$  и  $d_4^* \leq d < d_3^*$ ) и постепенное охлаждение частицы без зажигания ( $d < d_4^*$ ).

- Определен характер изменения областей различных режимов высокотемпературного зажигания инертной частицей в зависимости от температурного напора  $\Theta_h$  и значения критерия Тодеса  $Td$ .

## ЛИТЕРАТУРА

1. Дубовик А. В., Боболев В. К. Чувствительность жидких взрывчатых веществ к удару. — М.: Наука, 1978.
2. Вилюнов В. Н., Колчин А. К. О зажигании конденсированных ВВ при кондуктивном подводе тепла от сред с плохой теплопроводностью // Физика горения и взрыва. — 1966. — Т. 2, № 3. — С. 101–109.
3. Гришин А. М., Субботин А. Н. О сопряженном теплообмене между нагретыми инертными телами и реакционноспособной средой // Тепло- и массоперенос. — Минск: Изд-во ИТМО АН БССР, 1972. — Т. 1, ч. 1. — С. 286–294.
4. Гольдшлигер У. И., Прибыткова К. В., Барзыкин В. В. Зажигание конденсированных веществ накаливаемым телом конечных размеров // Физика горения и взрыва. — 1973. — Т. 9, № 1. — С. 119–123.
5. Лоскутов Г. С., Сандрыкина Т. С. Сопряженная задача кондуктивного теплообмена между нагретой частицей и реакционной средой // Математическое моделирование аэротермохимических явлений. — М.: Изд-во ВЦ АН ССР, 1974. — С. 145–155.
6. Кузнецов Г. В., Мамонтов Г. Я., Таратушкина Г. В. Численное моделирование зажигания конденсированного вещества нагретой до высоких температур частицей // Физика горения и взрыва. — 2004. — Т. 40, № 1. — С. 78–85.
7. Кузнецов Г. В., Мамонтов Г. Я., Таратушкина Г. В. Зажигание конденсированного вещества горячей частицей // Хим. физика. — 2004. — Т. 23, № 3. — С. 67–72.
8. Берман В. С., Рязанцев Ю. С. О поджигании гомогенной реагирующей среды тепловым источником с конечным запасом тепла // Прикладная математика и механика. — 1976. — Т. 40, вып. 6. — С. 1065–1069.
9. Аверсон А. Э., Барзыкин В. В., Мержанов А. Г. Закономерности зажигания конденсированных взрывчатых систем при идеальном теплообмене на поверхности с учетом выгорания // Инж.-физ. журн. — 1965. — Т. 9, № 2. — С. 245–249.
10. Вилюнов В. Н. Теория зажигания конденсированных веществ. — Новосибирск: Наука, 1984.
11. Зельдович Я. Б. К теории зажигания // Докл. АН СССР. — 1963. — Т. 150, № 2. — С. 283–285.
12. Аверсон А. Э., Барзыкин В. В., Мержанов А. Г. Приближенный метод решения задач тепловой теории зажигания // Докл. АН СССР. — 1968. — Т. 178, № 1. — С. 131–134.

- 
13. Буркина Р. С., Микова Е. А. Условия зажигания конденсированного вещества горячим инертным включением // Междунар. конф. «Лаврентьевские чтения по математике, механике и физике», 27–31 мая 2005 г.: тез. докл. — Новосибирск: Ин-т гидродинамики СО РАН, 2005. — С. 113–114.
14. Микова Е. А. Анализ критериев зажигания при инициировании конденсированного вещества горячей сферой // Физика и химия высокоэнергетических систем: сборник материалов I Всерос. конф. молодых ученых, 26–29 апреля 2005 г., Томск, Россия. — С. 266–268.

*Поступила в редакцию 4/IV 2008 г.*

---