

## О САМОВОСПЛАМЕНЕНИИ ДВУХКОМПОНЕНТНОЙ ГАЗОВЗВЕСИ

А. Ю. Крайнов

Томский государственный университет, 634050 Томск

Рассмотрена задача о самовоспламенении неподвижного облака частиц двух сортов (двухкомпонентной газовзвеси). Получены приближенные аналитические зависимости для периода индукции самовоспламенения, а также для критических условий воспламенения двухкомпонентной газовзвеси при наличии теплообмена облака с окружающей средой и в случае, когда один из компонентов состоит из частиц вещества, способного к эндотермической химической реакции. На основе сравнения полученных приближенных аналитических формул с численным решением нестационарной задачи определены области их применения.

В некоторых производственных и технологических процессах встречаются газовзвеси, состоящие из перемешанных в газе химически активных частиц различной природы. Для иницирования горения газовзвеси частиц вещества с большой энергией активации добавляют частицы легковоспламеняющихся веществ [1]. Для предотвращения возгорания газовзвесей, пожаротушения и огнепреграждения применяют инертные либо эндотермически реагирующие порошковые составы [2]. Естественно, химическое реагирование и разогрев таких смесей зависит от соотношения концентраций компонентов и соотношения их теплофизических и химико-кинетических характеристик. Для таких газовзвесей остаются актуальными вопросы оценки величины периода индукции и критических условий воспламенения.

Математическому моделированию самовоспламенения и горения газовзвесей посвящены работы [3–14]. В [3] предложена двухтемпературная модель самовоспламенения монодисперсной совокупности частиц и получена аналитическая формула для периода индукции воспламенения совокупности частиц. На основе этой модели проведены исследования периода индукции воспламенения полидисперсной совокупности частиц [4], взаимопереходов от самовоспламенения к зажиганию [5, 6], критических условий воспламенения совокупности частиц при наличии теплообмена облака частиц с окружающей средой [7, 8], выявлено многообразие типов тепловой динамики химически реагирующей совокупности частиц [9]. В работах [10–12] предложены математические модели воспламенения газовзвеси в условиях относительного движения фаз и сложной кинетики химических реакций. В работах [12–14] про-

ведено сравнение теоретических результатов, полученных на основе моделей, учитывающих двухтемпературность среды, с экспериментальными результатами для критических условий самовоспламенения монодисперсной газовзвеси [13] и периода индукции самовоспламенения [14], показавшее их хорошее совпадение.

Предложенный в [4] подход для оценки периода индукции полидисперсной совокупности частиц, основанный на модели [3], может быть распространен на случай многокомпонентной газовзвеси и позволяет определить период индукции и критические условия воспламенения для многокомпонентной газовзвеси. В данной работе такой анализ выполнен для двухкомпонентной газовзвеси.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассматривается неподвижное облако газовзвеси, состоящей из частиц двух сортов (двухкомпонентная газовзвесь). Предполагается, что частицы равномерно перемешаны в газе и друг с другом, имеют сферическую форму и свой фиксированный размер для каждого компонента. На поверхности частиц идет экзотермическая химическая реакция, зависящая от температуры по закону Аррениуса. Предэкспоненты, энергии активации и теплоты химических реакций на веществах, из которых состоят частицы, различны. Теплообмен между газовой фазой и частицами предполагается по закону Ньютона. Выгоранием частиц пренебрегаем. На границе облака предполагается теплообмен с окружающей средой. Распределение температуры по глубине облака и внутри частиц не учитывается.

Система уравнений, описывающая процессы в рассматриваемой двухкомпонентной газо-

взвеси, состоит из уравнений теплового баланса для частиц каждого компонента и из уравнения теплового баланса газовой фазы с учетом межфазного теплообмена:

$$c_1 \rho_1 V_1 \frac{dT_1}{dt} = Q_1 S_1 k_1 \exp\left(-\frac{E_1}{RT_1}\right) - \alpha_1 S_1 (T_1 - T_g), \quad (1)$$

$$c_2 \rho_2 V_2 \frac{dT_2}{dt} = Q_2 S_2 k_2 \exp\left(-\frac{E_2}{RT_2}\right) - \alpha_2 S_2 (T_2 - T_g), \quad (2)$$

$$c_g \rho_g \frac{dT_g}{dt} = \alpha_1 S_1 N_1 (T_1 - T_g) + \alpha_2 S_2 N_2 (T_2 - T_g) - \alpha_{ex} (T_g - T_0). \quad (3)$$

Начальные условия:

$$T_1(0) = T_2(0) = T_g(0) = T_0.$$

Здесь  $t$  — время;  $T$  — температура;  $c$  — теплоемкость;  $\rho$  — плотность;  $r$ ,  $S = 4\pi r^2$ ,  $V = 4/3 \pi r^3$  — радиус, площадь поверхности и объем частицы;  $k$ ,  $Q$ ,  $E$  — предэкспонент, тепловой эффект и энергия активации химической реакции;  $R$  — универсальная газовая постоянная;  $\alpha$ ,  $\alpha_{ex}$  — соответственно коэффициенты теплообмена частицы с газовой фазой и облака с окружающей средой;  $N$  — счетная концентрация частиц компонента; индексы 1, 2 соответствуют компонентам конденсированной фазы,  $g$  — газу.

Приведем систему уравнений (1)–(3) к безразмерной форме. В рассматриваемой системе имеется два характерных времени химической реакции  $t_{ch,1}$ ,  $t_{ch,2}$  (свое для каждого компонента газовой фазы). В качестве масштаба времени возьмем  $t_* = \max[t_{ch,1}, t_{ch,2}]$ , масштаба температуры —  $\Delta T = RT_0^2/E$ . Компонент с большим характерным временем химической реакции будем называть первым компонентом. Тогда система уравнений в безразмерной форме принимает вид

$$\frac{d\theta_1}{d\tau} = \exp\left(\frac{\theta_1}{1 + \beta\theta_1}\right) - \frac{\theta_1 - \theta_g}{\chi_1}, \quad (4)$$

$$\frac{d\theta_2}{d\tau} = Q \exp\left(\frac{E}{1 + \beta\theta_2}\right) - \frac{\theta_2 - \theta_g}{\chi_2}, \quad (5)$$

$$\frac{d\theta_g}{d\tau} = B_1 \frac{\theta_1 - \theta_g}{\chi_1} + B_2 \frac{\theta_2 - \theta_g}{\chi_2} - \frac{\theta_g}{\chi_{ex}}. \quad (6)$$

Начальные условия:

$$\theta_1(0) = \theta_2(0) = \theta_g(0) = 0. \quad (7)$$

В (4)–(6) введены следующие безразмерные переменные и параметры:

$$\tau = \frac{t}{t_*}; \quad t_* = \frac{c_1 \rho_1 V_1 \exp(E_1/RT_0)}{Q_1 k_1 S_1 E_1 / RT_0^2};$$

$$\theta_i = \frac{E}{RT_0^2} (T_i - T_0); \quad \beta = \frac{RT_0}{E_1}; \quad E = \frac{E_2}{E_1};$$

$$Q = \frac{Q_2 k_2 S_2 \exp(-E_2/RT_0) c_1 \rho_1 V_1}{Q_1 k_1 S_1 \exp(-E_1/RT_0) c_2 \rho_2 V_2} = \frac{t_{ch,1}}{t_{ch,2}};$$

$$\chi_i = \frac{c_i \rho_i V_i}{\alpha_i t_* S_i}; \quad \alpha_i = \frac{Nu \lambda_i}{r_i}, \quad Nu = 1;$$

$$\chi_{ex} = \frac{c_g \rho_g}{\alpha_{ex} t_*}; \quad B_i = \frac{c_i \rho_i V_i N_i}{c_g \rho_g}; \quad i = 1, 2.$$

Параметр  $B_i$  характеризует массовую концентрацию частиц соответствующего компонента,  $\chi_i$  — размер частиц,  $\chi_{ex}$  — внешний теплообмен,  $Q$  — отношение скоростей химического тепловыделения на частицах компонентов (отношение характерных времен химической реакции первого и второго компонентов),  $E$  — отношение энергий активации компонентов.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Период индукции самовоспламенения. Предположим, что внешнего теплообмена нет. Проведенный в [3] анализ выявил квазистационарное равновесие по температуре между частицей и газом, которое смещается из-за накопления тепла в газе. Это позволяет вместо (4) и (5) записать (влиянием малого параметра  $\beta$  пренебрегаем):

$$\theta_g = \theta_1 - \chi_1 \exp \theta_1 = \theta_2 - \chi_2 Q \exp(E\theta_2). \quad (8)$$

Связь между  $\theta_1$  и  $\theta_2$  найдем из (8). Введем  $\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1$ . Тогда

$$\theta_g = \theta_1 - \chi_1 \exp \theta_1 = \theta_2 - \Delta\theta - \chi_1 \exp(\theta_2 - \Delta\theta) - \chi_2 Q \exp(E\theta_2) + \chi_2 Q \exp(E\theta_1).$$

Для выполнения последнего равенства необходимо, чтобы

$$-\Delta\theta - \chi_1 \exp(\theta_2 - \Delta\theta) + \chi_2 Q \exp(E\theta_2) = 0.$$

Разлагая  $\exp(-\Delta\theta)$  в ряд по малой величине  $\Delta\theta$ , получим

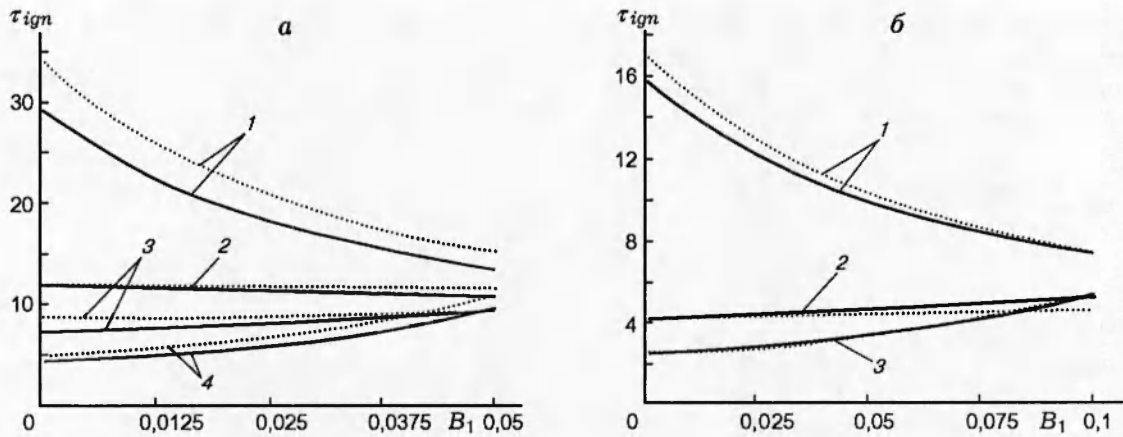


Рис. 1. Период индукции воспламенения двухкомпонентной газовой смеси:

сплошные линии — численное решение, пунктирные — приближенное аналитическое решение; а —  $B = B_1 + B_2 = 0,05$ ,  $1 - Q = 0,5$ ,  $E = 1$ ,  $\chi_1 = \chi_2 = 0,1$ ,  $2 - Q = 1$ ,  $E = 1$ ,  $\chi_1 = 0,1$ ,  $\chi_2 = 0,15$ ,  $3 - Q = 1$ ,  $E = 1,5$ ,  $\chi_1 = \chi_2 = 0,1$ ,  $4 - Q = 2$ ,  $E = 1$ ,  $\chi_1 = \chi_2 = 0,1$ ; б —  $B = B_1 + B_2 = 0,1$ ,  $\chi_1 = \chi_2 = 0,1$ ,  $1 - Q = 0,5$ ,  $E = 1$ ,  $2 - Q = 1$ ,  $E = 1,5$ ,  $3 - Q = 2$ ,  $E = 1$

$$\Delta\theta = \frac{\chi_2 Q \exp(E\theta_2) - \chi_1 \exp\theta_2}{1 - \chi_1 \exp\theta_2}. \quad (9)$$

Подставляя (8) в (6), получим

$$(1 - \chi_2 Q E \exp(E\theta_2)) \frac{d\theta_2}{d\tau} = B_2 Q \exp(E\theta_2) + B_1 \exp(\theta_2 - \Delta\theta) \approx B_2 Q \exp(E\theta_2) + B_1 \exp\theta_2 (1 - \Delta\theta). \quad (10)$$

Подставляя (9) в правую часть (10), преобразуем последнюю к виду

$$B_2 Q \exp(E\theta_2) + B_1 \exp(\theta_2) \frac{1 - \chi_2 Q \exp(E\theta_2)}{1 - \chi_1 \exp\theta_2} \approx B_2 Q \exp(E\theta_2) + B_1 \exp\theta_2 + \chi_1 B_1 \exp(2\theta_2) - B_1 \chi_2 Q \exp(E\theta_2).$$

В итоге уравнение (10) примет вид

$$(1 - \chi_2 Q E \exp(E\theta_2)) \frac{d\theta_2}{d\tau} = B_2 Q \exp(E\theta_2) + B_1 \exp\theta_2 + \chi_1 B_1 \exp(2\theta_2) - B_1 \chi_2 \exp(E\theta_2). \quad (11)$$

Как следует из [3], время выхода реакции в газовой смеси на квазистационарный режим существенно меньше квазистационарного периода реагирования; поэтому им можно пренебречь. Тогда, разделяя переменные и интегрируя (11) по температуре от нуля до  $\theta_*$  — температуры, при которой нарушается квазистационарный режим протекания реакции на частицах второго компонента [3], получим

$$\tau_{ign} = \int_0^{\theta_*} [1 - \chi_2 Q E \exp(E\theta_2)] \times [B_2 Q \exp(E\theta_2) + B_1 \exp\theta_2 + \chi_1 B_1 \exp(2\theta_2) - B_1 \chi_2 Q \exp(E\theta_2)]^{-1} d\theta_2, \quad (12)$$

$$\theta_* = (-1/E) \ln(QE\chi_2).$$

Заменив экспоненциальные члены полиномами второй степени

$$\exp(z\theta) = 1 + ((2 - z) \exp z - 2) \exp(z)\theta + (1 - (1 - z) \exp z)\theta^2,$$

приближенно вычислим интеграл (12):

$$\tau_{ign} = \left( \frac{2}{\sqrt{\Delta_1}} \arctg \frac{b_1 + 2c_1\theta_2}{\sqrt{\Delta_1}} - \chi_2 Q E \frac{2}{\sqrt{\Delta_2}} \arctg \frac{b_2 + 2c_2\theta_2}{\sqrt{\Delta_2}} \right) \Big|_0^{\theta_*}, \quad (13)$$

где  $\Delta_i = 4ac_i - b_i^2$ ,  $i = 1, 2$ ;  $a = B_2 Q + B_1(1 + \chi_1 - \chi_2 Q)$ ;  $b_1 = (B_2 Q - B_1 \chi_2 Q)((2 - E) \exp E - 2) + B_1(e - 2) - 2B_2 \chi_1$ ;  $c_1 = B_1 + (B_2 Q - B_1 \chi_2 Q)(1 - (1 - E) \exp E) + B_1 \chi_1(1 + \exp 2)$ ;  $b_2 = B_1((1 + E) \exp(1 - E) - 2) + B_1 \chi_1(E \exp(2 - E) - 2)$ ;  $c_2 = B_1(1 - E \exp(1 - E)) + B_1 \chi_1(1 - (E - 1) \exp(2 - E))$ .

Было проведено сравнение приближенной аналитической формулы для периода индукции воспламенения двухкомпонентной совокупности частиц (13) с численным решением системы уравнений (4)–(7) методом Рунге — Кутты — Мерсона. Параметры задачи варьировались в следующих пределах:  $0,05 < B =$

Значения периода индукции самовоспламенения газозвеси смеси каменного и бурого углей

B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	τ <sub>ign</sub> , с	
		модель (4)–(7)	формула (13)
0,01	0,09	3,84	3,86
0,05	0,05	4,48	4,83
0,09	0,01	5,86	6,92
0,025	0,025	6,8	9,7

B<sub>1</sub> + B<sub>2</sub> < 0,2; 0,05 < χ<sub>1</sub> < 0,2; 0,05 < χ<sub>2</sub> < 0,2; 0,5 < Q < 2; 0,75 < E < 1,5. На рис. 1 представлены зависимости периода индукции воспламенения двухкомпонентной газозвеси, полученные путем численного решения системы (4)–(7) и вычисленные по аналитической формуле (13), от соотношения массовых концентраций компонентов при различных значениях определяющих параметров задачи. Видно, что значения периода индукции, вычисленные по формуле (13), в исследованном диапазоне определяющих параметров задачи отличаются от численных значений не более чем на 15 %.

Вычислим период самовоспламенения газозвеси, состоящей из смеси мелких частиц каменного и бурого углей. Термохимические величины для этих углей по данным [15] следующие (индекс 1 соответствует каменному углю, 2 – бурому): c<sub>1</sub> = 960 Дж/(кг·К), ρ<sub>1</sub> = 1400 кг/м<sup>3</sup>, k<sub>1</sub> = 2 · 10<sup>4</sup> м/с, Q<sub>1</sub> = 28000 МДж/м<sup>3</sup>, E<sub>1</sub> = 115 кДж/моль, c<sub>2</sub> = 1090 Дж/(кг·К), ρ<sub>2</sub> = 1200 кг/м<sup>3</sup>, k<sub>2</sub> = 10<sup>4</sup> м/с, Q<sub>2</sub> = 6000 МДж/м<sup>3</sup>, E<sub>2</sub> = 100 кДж/моль. Размер частиц: r<sub>1</sub> = 10<sup>-4</sup> м, r<sub>2</sub> = 2 · 10<sup>-4</sup> м; начальная температура газозвеси T<sub>0</sub> = 500 К. Характерные времена химической реакции для этих компонентов t<sub>ch,1</sub> = 1,53 с, t<sub>ch,2</sub> = 0,87 с. В соответствии с выбором масштабов задачи t\* = t<sub>ch,1</sub> = 1,53 с. По этим данным вычислены параметры задачи: χ<sub>1</sub> = 0,05, χ<sub>2</sub> = 0,19, Q = 1,77, E = 0,87. Значения периода индукции самовоспламенения, полученные численно и по аналитической формуле (13) для четырех значений массовой концентрации компонентов газозвеси, приведены в таблице. Видно, что период индукции самовоспламенения газозвеси при увеличении доли массовой концентрации более легко реагирующего компонента уменьшается.

Необходимо отметить, что формула (13), хотя она и получена для случая Q ≥ 1 (в со-

ответствии с выбором масштаба времени нарушение квазистационарного режима реагирования происходит у частиц второго компонента раньше), дает достаточно корректные результаты для Q < 1 и справедлива в интервале 0,5 < Q < 2; погрешность резко возрастает при E > 1,5 и E < 0,5. Формула (13) применима и для оценки периода индукции воспламенения бидисперсной совокупности частиц (как частный случай двухкомпонентной) и полидисперсной совокупности частиц с бимодальной функцией распределения частиц по размерам [4].

**Критические условия самовоспламенения.** Если на границе облака существует внешний теплообмен, система уравнений (4)–(6) допускает наличие стационарных решений при некоторых значениях параметра χ<sub>ex</sub> и существует критическое значение χ<sub>ex</sub><sup>\*</sup>, при котором стационарное решение исчезает [7]. Следуя [7], найдем χ<sub>ex</sub><sup>\*</sup> для двухкомпонентной совокупности частиц. В стационарном случае система уравнений (4)–(6) принимает вид

$$\exp \theta_1 = \frac{\theta_1 - \theta_g}{\chi_1}, \quad (14)$$

$$Q \exp(E\theta_2) = \frac{\theta_2 - \theta_g}{\chi_2}, \quad (15)$$

$$B_1 \frac{\theta_1 - \theta_g}{\chi_1} + B_2 \frac{\theta_2 - \theta_g}{\chi_2} = \frac{\theta_g}{\chi_{ex}}. \quad (16)$$

Выразив θ<sub>g</sub> из уравнения (16), подставим его в (15):

$$Q \exp(E\theta_2) = \frac{1}{\chi_2} \left( \theta_2 - \frac{\theta_1 B_1 / \chi_1 + \theta_2 B_2 / \chi_2}{1 / \chi_{ex} + B_1 / \chi_1 + B_2 / \chi_2} \right). \quad (17)$$

Заменяя приближенно разность температур компонентов выражением вида

$$\Delta\theta = \frac{\chi_2 Q \exp(E\theta_2) - \chi_1 \exp \theta_2}{1 - \chi_1 \exp \theta_2} \approx (\chi_2 Q - \chi_1) \exp(E\theta_2)$$

и учитывая связь θ<sub>1</sub> = θ<sub>2</sub> - Δθ, из (17) получим

$$\exp(E\theta_2) = \frac{\theta_2}{\chi_2} \frac{1 / \chi_{ex}}{Q / \chi_{ex} + Q B_2 / \chi_2 + B_1 / \chi_2}. \quad (18)$$

Следуя [16], дифференцируем (18) по θ<sub>2</sub> и найдем условие исчезновения решения уравнения (18):

$$\exp(E\theta_2) = \frac{1}{E \chi_2} \frac{1 / \chi_{ex}}{Q / \chi_{ex} + Q B_2 / \chi_2 + B_1 / \chi_2}. \quad (19)$$

Из (18) и (19) находим  $\theta_2 = 1/E$  и получаем выражение

$$\chi_{ex}^* = \frac{\exp(-1) - \chi_2 EQ}{EQB_2 + EB_1}. \quad (20)$$

Зависимость (20) сравнивали с результатами численного решения задачи (4)–(6) с начальными условиями (7). Значение  $\chi_{ex}^*$  определялось путем численного решения системы уравнений (4)–(6) при различных значениях  $\chi_{ex}$ . При  $\chi_{ex} = \infty$  теплообмен с окружающей средой отсутствует, и из расчета получаем период самовоспламенения газозвеси  $\tau_{ign}$ . С уменьшением  $\chi_{ex}$  период самовоспламенения увеличивается, причем при приближении  $\chi_{ex}$  к  $\chi_{ex}^*$  малые его изменения (уменьшение менее чем на 1 %) приводят к значительному (в 2–3 раза) увеличению времени воспламенения. При дальнейшем уменьшении  $\chi_{ex}$  вначале температуры частиц и газа увеличиваются, а затем остаются постоянными. При проведении численных расчетов критерием выхода на стационарный режим реагирования было выбрано условие, согласно которому температуры газа и частиц после установления не меняются в течение  $\approx 1000$  периодов индукции самовоспламенения газозвеси при отсутствии внешнего теплообмена ( $1000\tau_{ign}$  при  $\chi_{ex} = \infty$ ). Значение  $\chi_{ex}^*$  соответствует максимальному значению  $\chi_{ex}$ , приводящему к установлению стационарного режима реагирования. Результаты расчетов представлены на рис. 2. Видно, что в исследованном диапазоне определяющих параметров задачи ( $0,05 < B = B_1 + B_2 < 0,2$ ;  $0,05 < \chi_1 < 0,2$ ;  $0,05 < \chi_2 < 0,2$ ;  $0,5 < Q < 2$ ;  $0,75 < E < 1,5$ ) аналитическая зависимость (20) с точностью не хуже 15 % согласуется с результатами численного решения. Формула (20) дает значения пределов самовоспламенения двухкомпонентной газозвеси для случая, когда начальные температуры газа и частиц одинаковы.

Критические условия воспламенения двухкомпонентной газозвеси, в которой один компонент реагирует с поглощением тепла. Рассматриваемая газозвесь состоит из равномерно перемешанных частиц двух сортов: экзотермически реагирующие частицы и частицы, на которых идет эндотермическая реакция. Предполагается, что теплообмен с окружающей средой отсутствует. В такой смеси возможен режим стационарного реагирования, когда все тепло, выделяющееся на частицах с экзотермической реакцией, поглощается частицами с эндотермиче-

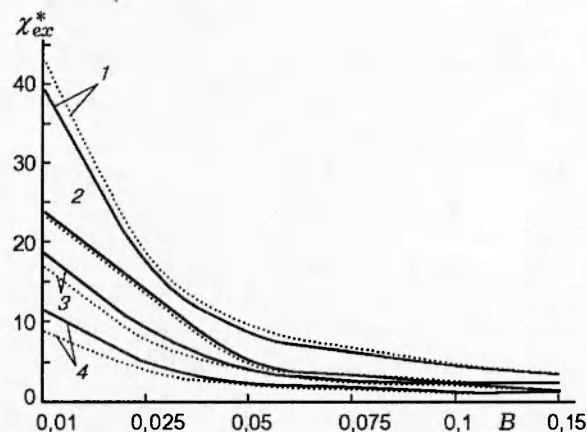


Рис. 2. Зависимости  $\chi_{ex}^*$  от массовой концентрации дисперсной фазы при различных соотношениях параметров задачи:

сплошные линии — численное решение, пунктирные — приближенное аналитическое решение;  $B_1 = B_2$ ; 1 —  $Q = 0,5$ ,  $E = 1$ ,  $\chi_1 = \chi_2 = 0,05$ , 2 —  $Q = 1$ ,  $E = 1$ ,  $\chi_1 = 0,1$ ,  $\chi_2 = 0,15$ , 3 —  $Q = 2$ ,  $E = 1$ ,  $\chi_1 = \chi_2 = 0,05$ , 4 —  $Q = 1$ ,  $E = 1,25$ ,  $\chi_1 = \chi_2 = 0,2$

ской реакцией. Тепловой взрыв такой смеси может быть заторможен более активной эндотермической реакцией на частицах и достаточной массовой концентрацией этих частиц. При этом температура частиц эндотермического компонента  $\theta_2$  меньше температуры экзотермического компонента  $\theta_1$ . Для обеспечения стационарного низкотемпературного режима реагирования необходимо, чтобы скорость поглощения тепла в единице объема газозвеси в реакции при температуре  $\theta_2$  была выше скорости выделения тепла в экзотермической реакции при температуре  $\theta_1$ . Это же условие должно выполняться при начальной температуре  $\theta_0$ . Задача определения критических условий воспламенения такой смеси состоит в нахождении соотношения массовых концентраций компонентов, обеспечивающего стационарное реагирование при заданных энергиях активации и тепловых эффектах реакций.

Система уравнений, описывающая стационарное реагирование газозвеси, имеет вид (14)–(16) при нулевой правой части в (16). Подставляя (14), (15) в (16) с учетом связи  $\theta_1$  и  $\theta_2$ ,

$$\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1 = \frac{\chi_1 \exp \theta_1 + \chi_1 |Q| \exp(E\theta_1)}{1 + E\chi_2 |Q| \exp(E\theta_1)}, \quad (21)$$

полученной аналогично (8), (9), приведем (16) к виду

$$B_1 \exp \theta_1 = B_2 |Q| \exp(E\theta_1 - E\Delta\theta). \quad (22)$$

Прологарифмировав (22), с учетом (21) получим

$$\theta_1 + \ln \frac{B_1}{B_2 |Q|} = E\theta_1 - E \frac{\chi_1 \exp \theta_1 + \chi_1 |Q| \exp(E\theta_1)}{1 + E\chi_2 |Q| \exp(E\theta_1)}.$$

В знаменателе второго члена правой части пренебрегаем слагаемым порядка  $\chi$  (по сравнению с единицей). Разложим  $\exp \theta_1$  и  $\exp(E\theta_1)$  в ряд, ограничиваясь двумя членами. Тогда

$$\theta_1 + \ln \frac{B_1}{B_2 |Q|} = \theta_1 (E - E\chi_1 - E^2 \chi_2 |Q|) - E\chi_1 - E\chi_2 |Q|.$$

Для существования стационарного режима реагирования необходимо выполнение неравенств

$$E - E\chi_1 - E^2 \chi_2 |Q| \leq 1, \quad (23)$$

$$-E\chi_1 - E\chi_2 |Q| \geq \ln \frac{B_1}{B_2 |Q|}, \quad (24)$$

смысл которых состоит в том, что при низкой температуре экзотермического компонента скорость теплопоглощения в газозвеси должна быть больше или равна скорости тепловыделения. При этом температура частиц экзотермического компонента должна быть меньше температуры, при которой происходит срыв с квазистационарного режима разогрева газозвеси,  $\theta_{1*} = \ln(1/\chi_1)$  [3, 5] (после достижения экзотермическими частицами температуры  $\theta_{1*}$  каждая частица воспламеняется самостоятельно, не «чувствует» окружающий ее газ и другие частицы):

$$\theta_1 = \frac{\ln(B_1/B_2 |Q|) + E\chi_1 + E\chi_2 |Q|}{E - E\chi_1 - E^2 \chi_2 |Q| - 1} < \theta_{1*} = \ln \frac{1}{\chi_1}. \quad (25)$$

Неравенство (23) определяет условие для энергии активации вещества эндотермического компонента; неравенства (24) и (25) дают условия для соотношения массовых концентраций компонентов:

$$\frac{B_1}{B_2} \leq |Q| \exp(-E\chi_1 - E\chi_2 |Q|), \quad (26)$$

$$\frac{B_1}{B_2} < |Q| \chi_1^{E\chi_1 + E^2 \chi_2 |Q| + 1 - E} \times \exp(-E\chi_1 - E\chi_2 |Q|). \quad (27)$$

Соотношение (27) «поглощается» условием (26) (если последнее выполняется, то низкотемпературный режим реагирования в газозвеси существует, при этом необязательно, чтобы достигалось условие (27)). Таким образом, критическое соотношение массовых концентраций компонентов, обеспечивающее стационарное протекание реакции, определяется равенством

$$\frac{B_1}{B_2} = |Q| \exp(-E\chi_1 - E\chi_2 |Q|). \quad (28)$$

Для определения точности приближенной аналитической оценки критических условий воспламенения (28) численно решалась нестационарная задача (4)–(6) с начальными условиями (7) для случая, когда второй компонент эндотермический (значения  $Q$  задавались отрицательными). В численных расчетах критическое значение соотношения  $B_1/B_2$  определялось следующим образом. Если эндотермический компонент отсутствует ( $B_1/B_2 = \infty$ ), то самовоспламенение происходит всегда, с периодом  $\tau_{ign}$ . С появлением в газозвеси некоторого количества эндотермического компонента период самовоспламенения увеличивается, и чем его больше, тем больше увеличивается период воспламенения. При определенной концентрации эндотермического компонента температуры газа и частиц, повысившись в начальный период, далее всегда остаются постоянными. При проведении численных расчетов принималось, что если температуры частиц и газа не меняются в течение  $\approx 1000$  периодов индукции самовоспламенения газозвеси при отсутствии эндотермического компонента ( $1000\tau_{ign}$  при  $B_1/B_2 = \infty$ ), то произошел выход на стационарный режим реагирования. Максимальное значение отношения  $B_1/B_2$ , обеспечивающее стационарный режим реагирования, соответствует критическому соотношению  $B_1/B_2$ . Критические значения соотношения  $B_1/B_2$  определялись с точностью 2 %.

Результаты численного решения представлены на рис. 3, где кривые разделяют области взрывного протекания реакции (ниже кривых) и стационарного реагирования (выше кривых). При одинаковой массовой концентрации компонентов с увеличением размера частиц экзотер-

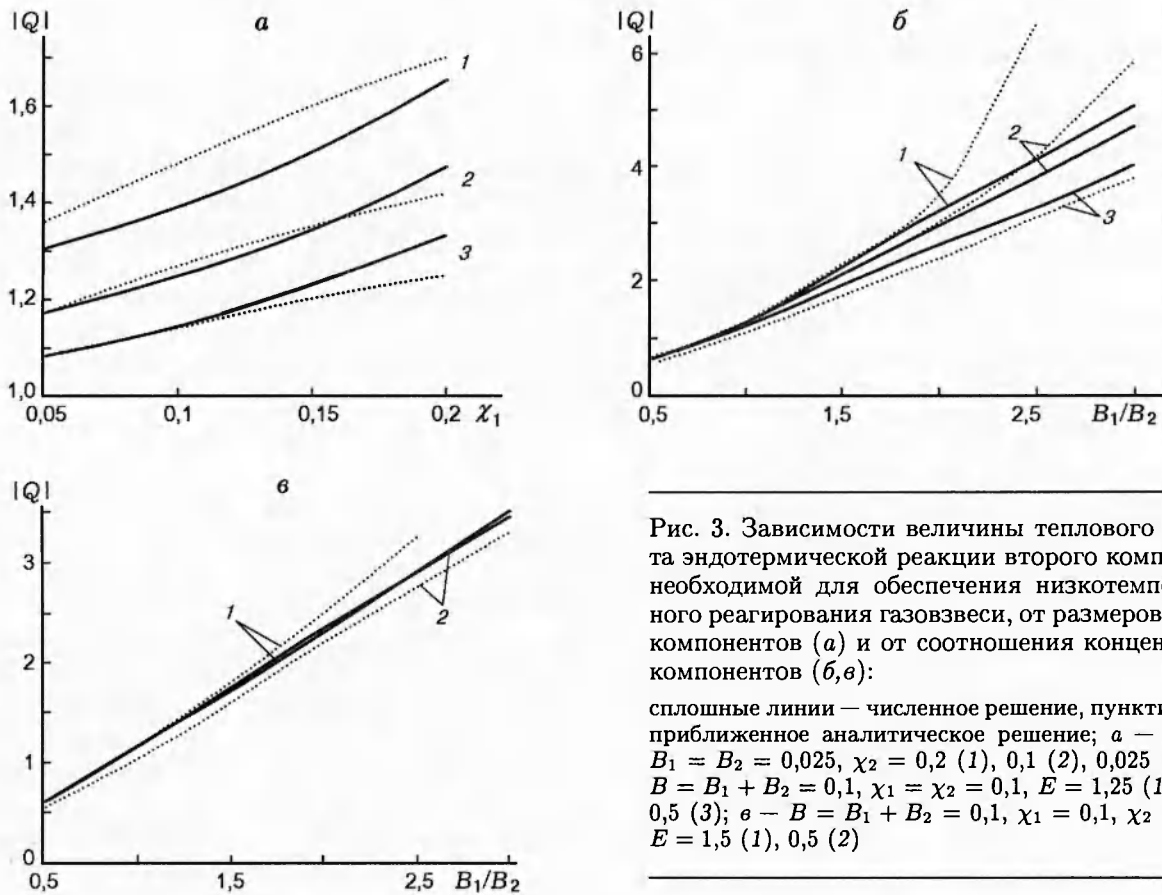


Рис. 3. Зависимости величины теплового эффекта эндотермической реакции второго компонента, необходимой для обеспечения низкотемпературного реагирования газозвеси, от размеров частиц компонентов (а) и от соотношения концентраций компонентов (б, в):

сплошные линии — численное решение, пунктирные — приближенное аналитическое решение; а —  $E = 1$ ,  $B_1 = B_2 = 0,025$ ,  $\chi_2 = 0,2$  (1),  $0,1$  (2),  $0,025$  (3); б —  $B = B_1 + B_2 = 0,1$ ,  $\chi_1 = \chi_2 = 0,1$ ,  $E = 1,25$  (1),  $1$  (2),  $0,5$  (3); в —  $B = B_1 + B_2 = 0,1$ ,  $\chi_1 = 0,1$ ,  $\chi_2 = 0,025$ ,  $E = 1,5$  (1),  $0,5$  (2)

мического компонента для обеспечения стационарного протекания реакции необходимо увеличивать теплопоглощение в эндотермической химической реакции, т. е. использовать частицы из вещества с большим теплопоглощением в химической реакции. С увеличением размера частиц эндотермического компонента для обеспечения стационарного протекания реакции необходимо также использовать частицы с большим теплопоглощением в химической реакции (см. рис. 3,а). Из рис. 3,б,в видно, что с увеличением соотношения  $B_1/B_2$  и энергии активации эндотермической химической реакции необходимое теплопоглощение в химической реакции увеличивается. С уменьшением размера частиц эндотермического компонента зависимость критической величины теплопоглощения от энергии активации химической реакции становится слабее (см. рис. 3,в). Приведенные в [2] оценки показывают, что для флегматизации горения химически активной газозвеси необходимо добавлять 70 ÷ 80 % (по массе) порошкового ингибитора. Как показы-

вают расчеты, при использовании эндотермически реагирующих частиц их массовая концентрация, необходимая для предотвращения возгорания, может быть значительно меньше.

На рис. 3,б,в пунктирными линиями представлены зависимости, построенные по формуле (28). Видно удовлетворительное согласие результатов численного решения задачи с полученными по приближенной аналитической формуле (28). При увеличении энергии активации и теплового эффекта эндотермической химической реакции аналитическая зависимость начинает отклоняться от результатов численного решения задачи, и при  $E > 1,5$  и  $|Q| > 5$  отклонение составляет более 20 %. (Эти условия близки к нарушению условия (23)). Таким образом, полученная приближенная аналитическая формула для критических условий воспламенения двухкомпонентной газозвеси частиц с экзо- и эндотермическими реакциями дает с точностью 15 % совпадение с численным решением полной системы уравнений в диапазоне параметров  $0,5 < E < 1,5$ ,  $1 < |Q| < 5$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате анализа модели самовоспламенения неподвижного облака двухкомпонентной газозвеси, построенной на основе двухтемпературной модели самовоспламенения совокупности частиц [3], получены приближенные аналитические формулы для периода индукции воспламенения и для критических условий самовоспламенения двухкомпонентной газозвеси при наличии теплообмена облака с окружающей средой. Рассмотрена задача о воспламенении двухкомпонентной газозвеси, в которой один из компонентов реагирует с поглощением тепла. Получена приближенная зависимость для определения критического соотношения массовых концентраций компонентов, при котором реализуется низкотемпературный стационарный режим реагирования. Сравнение полученных зависимостей с численным решением задачи показало их удовлетворительное согласие в определенной области изменения параметров задачи. Найдены пределы применимости полученных приближенных аналитических зависимостей.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Золотко А. Н., Мацко А. М., Полищук Д. И. и др. Воспламенение двухкомпонентной газозвеси частиц металлов // *Физика горения и взрыва*. 1980. Т. 16, № 1. С. 23–26.
2. Корольченко А. Я. Пожаровзрывоопасность промышленной пыли. М.: Химия, 1986.
3. Лисицин В. И., Руманов Э. Н., Хайкин Б. И. О периоде индукции при воспламенении совокупности частиц // *Физика горения и взрыва*. 1971. Т. 7, № 1. С. 3–6.
4. Атаманова И. В., Дик И. Г., Крайнов А. Ю. Период индукции немонодисперсной совокупности // *Горение гетерогенных и газовых систем: Материалы IX Всесоюз. симпозиума по горению и взрыву*. Черноголовка, 1989. С. 75–77.
5. Дик И. Г., Крайнов А. Ю., Макаров А. И. О воспламенении газозвеси в полости с нагретыми излучающими стенками // *Физика горения и взрыва*. 1990. Т. 26, № 5. С. 20–24.
6. Крайнов А. Ю. Воспламенение неоднородного облака частиц лучистым потоком // *Физика горения и взрыва*. 1997. Т. 33, № 4. С. 19–24.
7. Руманов Э. Н., Хайкин Б. И. Критические условия самовоспламенения совокупности частиц // *Физика горения и взрыва*. 1969. Т. 5, № 1. С. 129–136.
8. Korobeinikov V. P., Vorobiev D. V. Mathematical method for ignition and extinction study // *Preprints of 7th Intern. Colloquium on Dust Explosions*. Bergen, Norway, 1996. P. 2.50–2.57.
9. Fedorov A. V., Gosteev Yu. A. Physical-mathematical investigation of magnesium particle ignition // *Ibid.* P. 2.58–2.74.
10. Медведев А. Е., Федоров А. В., Фомин В. М. Описание воспламенения и горения газозвесей методами механики сплошной среды // *Физика горения и взрыва*. 1984. Т. 20, № 2. С. 3–9.
11. Федоров А. В. Численно-аналитическое исследование воспламенения частиц магния // *Физика горения и взрыва*. 1996. Т. 32, № 1. С. 75–84.
12. Федоров А. В. Воспламенение газозвесей в режиме взаимодействующих континуумов // *Физика горения и взрыва*. 1998. Т. 34, № 4. С. 57–64.
13. Ежовский Г. К., Озеров Е. С., Рощеня Ю. В. Критические условия воспламенения газозвеси порошков магния и циркония // *Физика горения и взрыва*. 1979. Т. 15, № 2. С. 97–102.
14. Rubak W., Zelkowski J., Demke S. Experimental and theoretical studies of ignition behavior of coal char and coal particle suspensions // *Preprints of 7th Intern. Colloquium on Dust Explosions*. Bergen, Norway, 1996. P. 3.1–3.10.
15. *Основы практической теории горения: Учебное пособие для вузов* / Под ред. В. В. Померанцева. Л.: Энергоатомиздат, 1986.
16. Франк-Каменецкий Д. А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. М.: Наука, 1987.

Поступила в редакцию 24/III 1997 г.,  
в окончательном варианте — 13/IV 1999 г.