

УДК 544.45

ВОСПЛАМЕНЕНИЕ ГИБРИДНОЙ СИСТЕМЫ. I. КРИТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ

Я.И. Вовчук, О.С. Рогульская, О.В. СимулинаИнститут горения и нетрадиционных технологий
Одесского национального университета им. И.И. Мечникова
ул. Дворянская, 2, г.Одесса, 65082 Украина**Аннотация**

Работа посвящена теоретическому определению критических условий самовоспламенения гибридной газозвеси частиц твердого горючего и их зависимостей от макроскопических и кинетических параметров дисперсной системы. Обсуждена возможность использования квазистационарного приближения для расчета максимального докритического разогрева и критического значения параметра Семенова для гибридной взвеси. Методом диаграммы Н. Н. Семёнова показано, что положение предела самовоспламенения гибридной газозвеси зависит не только от величины коллективного параметра, который задается соотношением поверхностей тепловыделения при гетерогенной реакции и теплоотвода газозвеси в целом, как это имеет место для однокомпонентной газозвеси, но также от отношений характерных времен и энергий активации гомогенной и гетерогенной реакций. Предложено аппроксимационное выражение для расчета безразмерного разогрева дисперсной системы на пределе воспламенения. Представлены результаты численных и аналитических расчётов. Количественно определены диапазоны изменения параметров гибридной газозвеси, где для ее воспламенения определяется одновременным вкладом в саморазогрев системы гетерогенной, так и гомогенной реакций.

Ключевые слова: газ, системы, самовоспламенение, моделирование

Список принятых обозначений

r_p - радиус частицы;
 c_p - удельная теплоемкость;
 ρ - плотность;
 m - масса;
 k_0 - предэкспоненциальный множитель;
 E - энергия активации;
 Q - тепловой эффект, реакции;
 R - универсальная газовая постоянная;
 T - температура;
 α - коэффициент теплообмена;
 λ - коэффициент теплопроводности;
 S - площадь поверхности;
 V - объем;
 N_0 - число частиц в единице объема.
 ox - окислитель;
 gf - газообразное горючее;
 p - частица твердого горючего;
 g - газ;
 w - стенка;
 kr - критические условия;
 0 - начальные условия;
 1 - гетерогенная реакция;
 2 - гомогенная реакция.

ском хозяйстве достаточно часто встречаются ситуации, когда в замкнутых объемах в воздухе одновременно присутствует взвешенная пыль горючих материалов и горючий газ, то есть возникает гибридная дисперсная система. Такие ситуации могут появляться как при получении, хранении и переработке неорганических и органических веществ, так и при использовании твердых горючих в энергетических устройствах, в которых для повышения эффективности их работы в камеры сгорания добавляется газообразное горючее. Условия воспламенения и последующего взрыва пыли твердых горючих материалов, взвешенной в окисляющем газе, существенно облегчаются, когда в среде содержится даже небольшие количества горючего газа [1]. Поэтому практические задачи обеспечения пожарной безопасности и оптимизации способов получения тепла, особенно при использовании низкосортных твердых горючих, требуют углубления представлений теории горения о реагировании двухфазных многокомпонентных горючих систем. Изучение режимов и условий воспламенения дисперсной системы, в которой к твердому горючему, распыленному в газообразном окислителе, тем или иным способом добавляется горючий газ, только начинается.

Введение

В промышленности, энергетике и сель-

(см., например, [2 - 6]). В работе Ю.А. Гостеева и А.В. Федорова [4] при анализе воспламенения газовзвеси частиц угля было отмечено, что в условиях, когда характерное время образования летучих много меньше характерных времен их окисления и окисления коксового остатка, "воспламенению кокса предшествует воспламенение летучих веществ в объеме возле частицы". Заметим, что при таких соотношениях характерных времен газовзвесь можно рассматривать как гибридную дисперсную систему.

Настоящая работа посвящена изучению условий самовоспламенения гибридной дисперсной системы, в которой газообразное и твердое горючие присутствуют в окисляющем газе изначально.

Физико-математическая модель

Теоретическая модель процессов, происходящих при объемном воспламенении гибридной газовзвеси, сформулирована в двухтемпературном приближении [7], то есть газовзвесь рассматривается как две вложенные одна в другую сплошные среды - газовая с температурой T_g и конденсированная с температурой T_p . Используются также следующие упрощающие предположения [8-10]:

- монодисперсные сферические частицы горючего равномерно распределены в объеме, ограниченном стенками с постоянной температурой T_w ;
- теплообмен газовзвеси со стенками сосуда описывается законом Ньютона;
- в предвоспламенительный период выгорание окислителя, твердого и газообразного горючих, теплообмен излучением между частицами горючего и стенками сосуда, а также изменение величины присоединенного объема, пренебрежимо малы;
- на внешней поверхности частиц горючего происходит только одна стехиометрическая гетерогенная реакция первого порядка по окислителю;
- диффузионное сопротивление скорости гетерогенного реагирования не учитывается.

В принятых упрощениях система уравнений математической модели, описывающая тепловой баланс для частицы и газа в гибридной газовзвеси, отличается от модели воспламенения однокомпонентной газовзвеси только дополнительным слагаемым в уравнении прогрева газа (2), которое учитывает тепловыде-

ление гомогенной реакции газообразной горючей компоненты взвеси с окисляющим газом:

$$\frac{1}{3} r_p c_p^p \rho_p \frac{dT_p}{dt} = k_{01} e^{-\frac{E_1}{RT_p}} Q_1 - \alpha_p (T_p - T_g); \quad (1)$$

$$c_p^g \rho_g \frac{dT_g}{dt} = Q_2 k_{02} e^{-\frac{E_2}{RT_g}} + N_0 \alpha_p S_p (T_p - T_g) - \frac{S_w}{V} \alpha_w (T_g - T_w); \quad (2)$$

с начальными условиями:

$$t = 0; T_p = T_p^0, T_g = T_g^0 \quad (3)$$

Здесь:

r_p - радиус частицы,

$c_p^p, c_p^g, \rho_p, \rho_g$ - удельные теплоемкости и плотности частицы и газа,

k_{01} и k_{02}, E_1 и E_2, Q_1 и Q_2 - предэкспоненциальные множители, энергии активации и тепловые эффекты гетерогенной и гомогенной реакций, соответственно,

R - универсальная газовая постоянная,

T_p, T_g - температуры частицы и газа,

α_p и α_w - коэффициенты теплоотдачи частица-газ и газ-стенка, соответственно,

N_0 - число частиц в единице объема,

S_p и S_w - поверхности индивидуальной частицы в газовзвеси и стенки сосуда, соответственно,

V_w - объем сосуда.

Для выявления аналогий и наиболее существенных различий воспламенения однокомпонентной и гибридной газовзвесей частиц, а также для сокращения числа параметров задачи, представим систему (1) - (3) в безразмерном виде с использованием общепринятых безразмерных переменных и параметров;

$$\frac{d\theta_p}{d\tau} = e^{\frac{\theta_p}{1+\beta\theta_p}} - \frac{\theta_p - \theta_g}{\alpha}; \quad (4)$$

$$\frac{1-B}{B} \frac{d\theta_g}{d\tau} = \tau_{21} e^{\frac{\varepsilon_{21}\theta_g}{1+\beta\theta_g}} - \frac{\theta_g - \theta_w}{A\alpha} + \frac{\theta_p - \theta_g}{\alpha} \quad (5)$$

с начальными условиями

$$\tau = 0; \theta_p = \theta_p^0; \theta_g = \theta_g^0; \theta_w = \theta_w^0 = const. \quad (6)$$

Здесь:

$$\theta_p = \frac{E}{RT_*^2}(T_p - T_*); \theta_g = \frac{E}{RT_*^2}(T_g - T_*); \theta_w = \frac{E}{RT_*^2}(T_w - T_*); \tau = \frac{t}{t_*},$$

$$t_* = \frac{RT_*^2}{E_1} \frac{c_p^p r_p \rho_p}{3Q_1 k_{01} e^{\frac{E_1}{RT_*}} C_{ox}}$$

$$\alpha = \frac{E_1}{RT_*^2} \frac{Q_1 k_{01} e^{\frac{E_1}{RT_*}}}{\alpha_p}; \beta = \frac{RT_*}{E_1}; A = N_0 V_w \frac{\alpha_p S_p}{\alpha_w S_w}; B = \frac{c_p^p m_p N_0}{c_p^p m_p N_0 + c_p^g \rho_g};$$

$$\varepsilon_{21} = \frac{E_2}{E_1}; \tau_{21} = \frac{r_p}{3} \frac{\rho_p}{N_0 m_p} \frac{Q_2}{Q_1} \frac{k_{02} e^{\frac{E_{21}}{RT_*}}}{k_{01} e^{\frac{E_1}{RT_*}}};$$

α - параметр Семенова - задает отношение характерных времен теплоотвода и реакции на поверхности индивидуальной частицы взвеси [9],

β - параметр Аррениуса - описывает температурную чувствительность системы [11],

A - коллективный параметр [9] - определяет степень взаимного влияния частиц взвеси в процессе ее саморазогрева,

B - относительная массовая теплоемкость частиц твердого горючего в газозвеси.,

Как видим, в отличие от теории воспламенения газозвесей частиц горючих, реагирующих гетерогенно [8,9], в предлагаемой в настоящей работе модели воспламенения гибридной газозвеси присутствуют два дополнительных параметра: отношение энергий активации - ε_{21} и характерных времен тепловыделения гетерогенной и гомогенной реакций в объеме газозвеси - τ_{21} .

В предельном случае, когда $\tau_{21} \rightarrow 0$, то есть характерное время тепловыделения реакции горючего газа с окислителем много больше характерного времени тепловыделения при реагировании твердого горючего, модель, описываемая системой уравнений (4) - (6), сводится к классической модели воспламенения однокомпонентной газозвеси частиц твердого горючего в газообразном окислителе, реагирующих гетерогенно [8,9]. В этом пределе критические условия самовоспламенения гибридной газозвеси должны совпадать с определенными в работе Э.Н. Руманова и Б.И. Хайкина [9] условиями для однокомпонентной взвеси:

$$\theta_p^{kr} = 1; \quad \alpha_{kr}^d = \frac{1}{(1+A)e} \quad (7)$$

Численное решение системы уравнений (4) - (6) позволило проследить динамику изменения температур частиц и газа, а также определить критические значения параметра Семенова и времена задержки воспламенения в зависимости от параметров гибридной дисперсной системы¹ в режиме самовоспламенения, когда начальные температуры частиц и газа равны температуре стенки сосуда. (При расчетах было принято, что $T_* = T_w = 0$, то есть $\theta_g^0 = \theta_p^0 = 0$). Кроме того, результаты проведенных параметрических расчетов воспламенения гибридной газозвеси вблизи предела воспламенения использованы нами как обоснование применимости метода диаграммы Н.Н. Семенова для аналитического определения критических условий воспламенения гибридной газозвеси.

Аналитическое приближение для критических условий самовоспламенения

В настоящей работе рассмотрим, как влияет гомогенная реакция газообразного горючего, которая протекает параллельно с реагированием окислителя на поверхности частиц взвеси, на величину максимального предвзрывного разогрева и критические значения параметра Семенова для самовоспламенения гибридной газозвеси.

В работе Э.Н. Руманова и Б.И. Хайкина [9] было показано, что вблизи предела воспламенения однокомпонентной газозвеси частиц твердого горючего температуры частиц и газа

¹ Для решения использован метод Рунге-Кутты 4-го порядка с автоматическим подбором шага интегрирования, применимость которого проверялась сравнением результатов расчетов с данными по воспламенению однокомпонентной газозвеси, приведенными в работах Б.И. Хайкина с соавторами [9,10].

изменяются так, что в каждый момент времени скорость выделения тепла при гетерогенной реакции практически равна скорости теплоотвода от индивидуальной частицы в газ, температура которого растет по мере саморазогрева взвеси. Причем, так как частицы реагируют в кинетическом режиме, их температура близка к температуре газа.

Очевидно, что в гибридной взвеси тепловыделение при реакции газовой компоненты, дополняет теплоприход от гетерогенного реагирования твердого горючего. Однако, как показало численное решение системы (4) - (6), это дополнительное тепловыделение не изменяет качественную картину самовоспламенения и потому критические условия самовоспламенения гибридной дисперсной системы могут быть найдены с помощью использованного в работе [9] условия касания кривой скорости тепловыделения в объеме взвеси q^+ и прямой отвода тепла в стенку сосуда q^- - диаграмма Н.Н. Семенова:

$$q^+ = q^-; \frac{dq^+}{d\theta} = \frac{dq^-}{d\theta}.$$

Стационарное решение динамической системы (4) - (5) при выборе размерной температуры стенки $T_* = T_w$ в качестве масштабной в приближении Франк-Каменецкого ($\beta \rightarrow 0$) имеет вид

$$e^{\theta_p^{st}} = \frac{\theta_p^{st} - \theta_g^{st}}{\alpha}; \quad (8)$$

$$\tau_{21} e^{\varepsilon_{21} \theta_g^{st}} + \frac{\theta_p^{st} - \theta_g^{st}}{\alpha} = \frac{\theta_g}{A\alpha}. \quad (9)$$

Тогда, учитывая, что в процессе предвоспламенительного разогрева $\theta_g^{kr} \approx \theta_p^{kr}$ (температура газа отличается от температуры частиц на величину близкую по порядку к значению $\alpha \ll 1$) получаем систему уравнений для определения безразмерной температуры частицы θ_p^{kr} в точке касания кривых теплоприхода и теплоотвода и значения параметра Семенова на пределе воспламенения гибридной газовой взвеси:

$$\frac{1 - \theta_p^{kr}}{\varepsilon_{21} \theta_p^{kr} - 1} e^{(1 - \varepsilon_{21}) \theta_p^{kr}} = \frac{A}{1 + A} \tau_{21}; \quad (10)$$

$$\alpha_{kr}^{hd} = \frac{1}{1 + \varepsilon_{21} \tau_{21} \frac{A}{(1 + A)} e^{(\varepsilon_{21} - 1) \theta_p^{kr}}} \cdot \frac{1}{(1 + A) e^{\theta_p^{kr}}}. \quad (11)$$

Результаты и обсуждение

Из вида уравнения (10) следует, что для значений $A > 1$ максимальный докритический разогрев θ_p^{kr} определяются в первую очередь величиной параметров ε_{21} и τ_{21} ¹. Расчеты показали, что при вариации значения коллективного параметра в интервале $1 < A < 10^3$ для $\varepsilon_{21} = 0,33 \div 3,0$ и $\tau_{21} = 10^{-4} \div 10^4$ величина θ_p^{kr} изменяется не более, чем на 15%.

Зависимость $\theta_p^{kr} = \theta_p^{kr}(\varepsilon_{21})$ представлена на рис. 1.

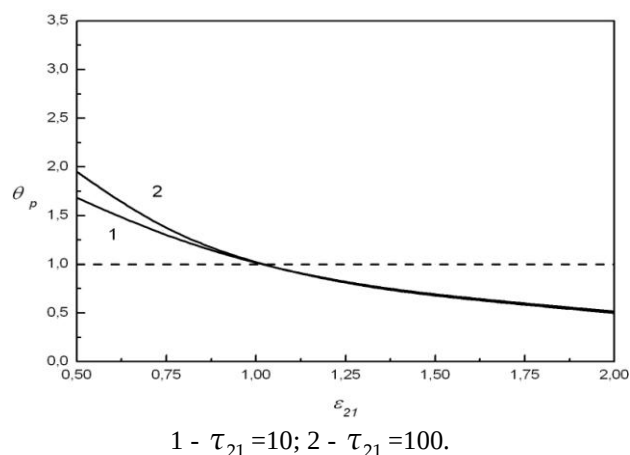


Рис. 1 – Зависимость максимального докритического разогрева на пределе воспламенения θ_{kr} от отношения энергий активации гомогенной и гетерогенной реакций ε_{21} .

Как видим, величина θ_p^{kr} может быть как больше, так и меньше единицы в зависимости от соотношения значений энергий активации гомогенной и гетерогенной реакций ε_{21} . Так, для значений $\varepsilon_{21} < 1$ величина θ_p^{kr} лежит в

¹ Известно, что взаимное тепловое влияние частиц в двухфазной дисперсной системе проявляется тем сильнее, чем больше значение "коллективного параметра A ". При $A \gg 1$, когда наблюдается тепловая гомогенизация взвеси [9], отношение $A/(1 + A)$ близко к единице.

интервале $1 < \theta_p^{kr} < 1/\varepsilon_{21}$, тогда как при $\varepsilon_{21} > 1$ диапазон изменения θ_p^{kr} составляет $1/\varepsilon_{21} < \theta_p^{kr} < 1$. В случае, когда энергии активации обеих реакций близки ($\varepsilon_{21} \rightarrow 1$), решение системы уравнений (8), (9) дает $\theta_p^{kr} \rightarrow 1$, обозначенное на рисунке пунктирной линией, то есть максимальные стационарные разогревы поверхности индивидуальной частицы в газозвеси при самовоспламенении гибридной и однокомпонентной взвесей совпадают.

Расчет значений докритического разогрева θ_p^{kr} в зависимости от параметра τ_{21} , приведенный на рис. 2, показал, что в случае, когда гомогенная реакция активирована слабее гетерогенной ($\varepsilon_{21} < 1$ - рис. 2а), существенное изменение величины предвоспламенительного разогрева наблюдается в значительно более широком интервале значений отношения характерных времен тепловыделения этих реакций τ_{21} по сравнению с обратным соотношением их энергий активации ($\varepsilon_{21} > 1$ - рис. 2б). Причем, для значений $\varepsilon_{21} \geq 1$ максимальный стационарный разогрев практически не зависит от τ_{21} , если характерная скорость тепловыделения реакции газовой компоненты на порядок больше, чем для реагирования дисперсного горючего ($\tau_{21} \geq 10$).

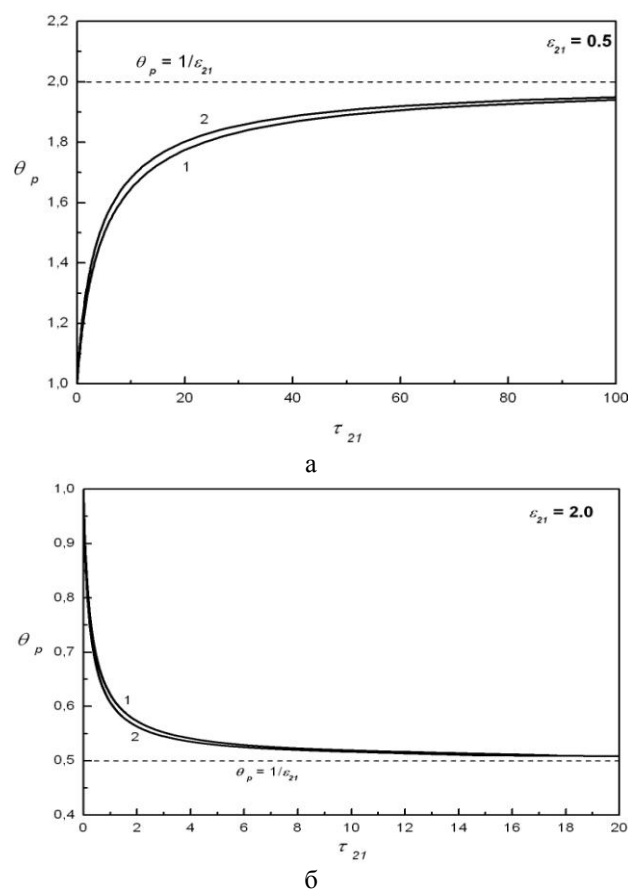
Практические расчеты зависимости критического разогрева θ_p^{kr} от всех параметров задачи в интервале значений $0,33 \leq \varepsilon_{21} \leq 3$ можно существенно упростить, если величину θ_p^{kr} представить в виде:

$$\theta_p^{kr} = \frac{1 + \tau_{21} \frac{A}{1+A} e^{\frac{\varepsilon_{21}-1}{\varepsilon_{21}}}}{1 + \varepsilon_{21} \tau_{21} \frac{A}{1+A} e^{\frac{\varepsilon_{21}-1}{\varepsilon_{21}}}} \cdot (12)$$

Сравнение результатов вычислений при использовании этого выражения с данными, полученными решением системы уравнений (8), (9), а также численного решения системы (1) - (9), представлено ниже в таблице 1.

Влияние параметров ε_{21} и τ_{21} , определяющих отличия условий самовоспламенения гибридной газозвеси от однокомпонентной на критическое значение параметра Семенова $\mathcal{A}_{kr}^{hd}$, проявляется наиболее наглядно, если соответствующие зависимости представить в

координатах $(1+A)\mathcal{A}_{kr}^{hd} = f(\varepsilon_{21}, \tau_{21})$.



1 - $A=5$; 2 - $A=500$.

а) Отношение энергий активации гомогенной и гетерогенной реакций $\varepsilon_{21}=0,5$.

б) Отношение энергий активации гомогенной и гетерогенной реакций $\varepsilon_{21}=2$.

Рис. 2 – Зависимость безразмерной критической температуры θ_{kr} от относительного времени тепловыделения гетерогенной реакции τ_{21} .

При заданных значениях отношения характерных времен тепловыделения гетерогенной и гомогенной реакций τ_{21} условия самовоспламенения гибридной газозвеси тем мягче, чем сильнее активирована газофазная реакция - рис. 3.

Характерный, S-образный, вид зависимости $\mathcal{A}_{kr}^{hd} = f(\tau_{21})$, представленной на рис. 4, демонстрирует, как перераспределяется вклад каждой из параллельных реакций в предвоспламенительном разогреве двухкомпонентной смеси горючих, и позволяет выделить область изменения параметра τ_{21} , внутри которой для определения значения параметра Семенова на

пределе самовоспламенения необходимо учитывать обе реакции.

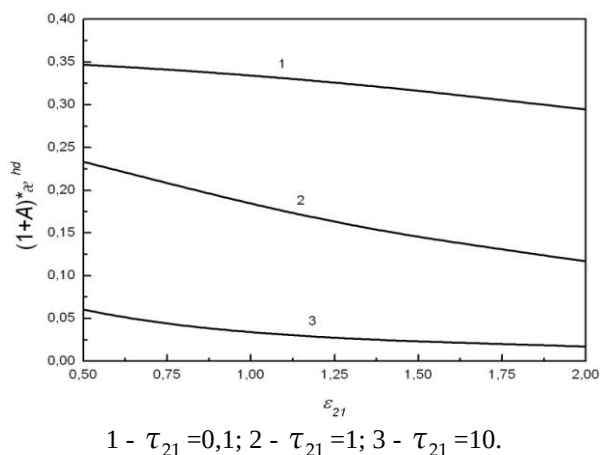


Рис. 3 – Зависимость критического параметра Семёнова $\mathcal{A}^{hd}$ от отношения энергий активации гомогенной и гетерогенной реакций ε_{21} .

Легко видеть, что уравнения (10) и (11) дают предельные переходы. Так, при $\tau_{21} \rightarrow 0$ из уравнения (10) следует $\theta_p^{kr} \rightarrow 1$, а из уравнения (11) - $\mathcal{A}_{kr}^{hd} \rightarrow \mathcal{A}_{kr}^d = \frac{1}{(1+A)e}$, что отвечает предельному переходу к критическим условиям (7) для однокомпонентной газозвеси - пунктирная прямая на рис. 4.

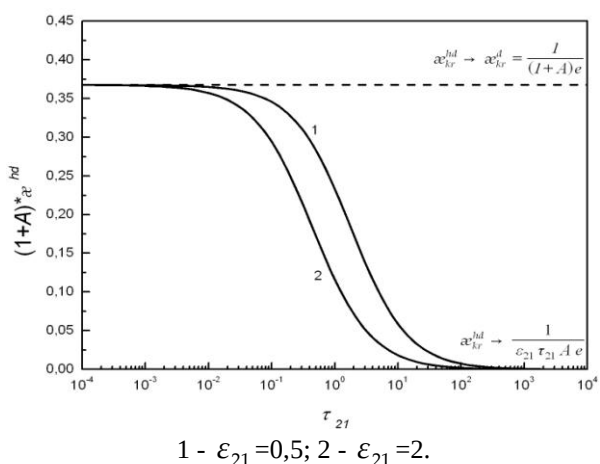


Рис. 4 – Зависимость критического параметра Семёнова $\mathcal{A}^{hd}$ от относительного времени тепловыделения гетерогенной реакции τ_{21} .

Другими словами, в случае, когда характерная скорость тепловыделения газообразной компоненты гибридной газозвеси значительно

меньше скорости выделения тепла на поверхности частиц во взвеси, такая бинарная дисперсная система воспламеняется так же, как однокомпонентная.

В другом пределе, когда $\tau_{21} \gg 1$, максимальный докритический разогрев стремится к величине $\theta_p^{kr} \rightarrow 1/\varepsilon_{21}$ (абсцисса вертикальной асимптоты функции:

$$f(\theta_p^{kr}) = \frac{1 - \theta_p^{kr}}{\varepsilon_{21} \theta_p^{kr} - 1} e^{(1 - \varepsilon_{21}) \theta_p^{kr}}$$

есть $\theta_p^{kr} = 1/\varepsilon_{21}$),

а предельное критическое значение критерия Семёнова в принятых в настоящей работе безразмерных параметрах - к $\mathcal{A}_{kr}^{hd} \rightarrow \frac{1}{\varepsilon_{21} \tau_{21} A e}$.

Подстановка вида этих параметров в последнее выражение дает классический вид критического условия теплового взрыва гомогенной системы без учета выгорания (реакция нулевого порядка), полученный Н.Н. Семёновым (цитируется по [12])

$$\frac{E_2}{RT_*^2} \frac{Q_2}{\alpha_w} \frac{V_w}{S_w} k_{02} e^{-\frac{E_2}{RT_*}} = \frac{1}{e}.$$

В заключение остановимся на сопоставлении проведенных расчетов с результатами численного интегрирования уравнений (4) - (6) исходной модели. Частично эти данные приведены в таблице 1¹. Из таблицы видно, что "квазистационарный" подход, предложенный в [9], может быть применен для нахождения критических условий самовоспламенения как однокомпонентных, так и гибридных газозвесей. Вполне удовлетворительное согласование с данными численного решения этой задачи для двухкомпонентной дисперсной системы дает и применение аппроксимационного выражения (12).

¹ В таблице 1 приведены результаты численного решения системы уравнений (4) - (6) в приближении Д.А. Франк-Каменецкого ($\beta = 0$). Заметим, что, условия касания кривых тепловыделения и теплоотвода могут быть легко получены и в случае $\beta \neq 0$. Однако, как известно (см., например, [12]), влияние этого параметра мало и не оправдывает усложнения вида получаемых уравнений.

Таблица 1 - Сравнение результатов расчетов θ_p^{kr} и α_{kr}^{hd} при различных параметрах задачи

ε_{21}	A	τ_{21}	θ_p^{kr}					α_{kr}^{hd}				
			Ур-ние (10)	Выраж. (12)	Числ. интегр.	Δ ур-ние (10)	Δ выраж. (12)	Ур-ние (10)	Выраж. (12)	Числ. интегр.	Δ ур-ние (10)	Δ выраж. (12)
0,5	5	0,1	1,02	1,02	1,02	-0,62%	0,29%	$5,84 \cdot 10^{-02}$	$5,89 \cdot 10^{-02}$	$5,86 \cdot 10^{-02}$	0,37%	-0,54%
		1,0	1,19	1,13	1,20	1,08%	5,59;	$4,13 \cdot 10^{-02}$	$4,34 \cdot 10^{-02}$	$4,22 \cdot 10^{-02}$	2,14%	-2,78%
		10	1,65	1,61	1,68	1,99%	4,45%	$1,14 \cdot 10^{-02}$	$1,17 \cdot 10^{-02}$	$1,16 \cdot 10^{-02}$	2,40%	-0,37%
	500	0,1	1,03	1,02	1,03	0,10%	1,16%	$6,93 \cdot 10^{-04}$	$7,00 \cdot 10^{-04}$	$6,93 \cdot 10^{-04}$	0,02%	-1,06%
		1,0	1,21	1,16	1,20	-1,15%	3,74%	$4,66 \cdot 10^{-04}$	$4,91 \cdot 10^{-04}$	$4,66 \cdot 10^{-04}$	0,03%	-5,34%
		10	1,68	1,65	1,68	-0,16%	1,94%	$1,18 \cdot 10^{-04}$	$1,21 \cdot 10^{-04}$	$1,18 \cdot 10^{-04}$	0,06%	-2,29%
1,0	5	0,1	1,00	1,00	1,00	0,00%	0,00%	$5,66 \cdot 10^{-02}$	$5,66 \cdot 10^{-02}$	$5,72 \cdot 10^{-02}$	1,12%	1,12%
		1,0	1,00	1,00	1,04	3,85%	3,85%	$3,34 \cdot 10^{-02}$	$3,34 \cdot 10^{-02}$	$3,49 \cdot 10^{-02}$	4,23%	4,23%
		10	1,00	1,00	1,01	0,99%	0,99%	$6,57 \cdot 10^{-03}$	$6,57 \cdot 10^{-03}$	$6,68 \cdot 10^{-03}$	1,63%	1,63%
	500	0,1	1,00	1,00	0,98	-2,04%	-2,04%	$6,68 \cdot 10^{-04}$	$6,68 \cdot 10^{-04}$	$6,68 \cdot 10^{-04}$	0%	0%
		1,0	1,00	1,00	0,98	-2,04%	-2,04%	$3,68 \cdot 10^{-04}$	$3,68 \cdot 10^{-04}$	$3,68 \cdot 10^{-04}$	0%	0%
		10	1,00	1,00	0,99	-1,01%	-1,01%	$6,69 \cdot 10^{-05}$	$6,69 \cdot 10^{-05}$	$6,69 \cdot 10^{-05}$	0%	0%
2,0	5	0,1	0,86	0,89	0,90	4,57%	0,86%	$5,07 \cdot 10^{-02}$	$4,85 \cdot 10^{-02}$	$5,27 \cdot 10^{-02}$	3,77%	7,81%
		1,0	0,62	0,63	0,64	2,84%	1,03%	$2,18 \cdot 10^{-02}$	$2,137 \cdot 10^{-02}$	$2,30 \cdot 10^{-02}$	5,11%	7,02%
		10	0,52	0,52	0,51	-1,42%	-1,48%	$3,43 \cdot 10^{-03}$	$3,43 \cdot 10^{-03}$	$3,47 \cdot 10^{-03}$	1,09%	1,15%
	500	0,1	0,84	0,88	0,84	-0,21%	-4,31%	$5,88 \cdot 10^{-04}$	$5,62 \cdot 10^{-04}$	$5,88 \cdot 10^{-04}$	0,05%	4,50%
		1,0	0,61	0,62	0,60	-1,20%	-2,75%	$2,33 \cdot 10^{-04}$	$2,29 \cdot 10^{-04}$	$2,33 \cdot 10^{-04}$	0,04%	1,68%
		10	0,52	0,52	0,51	-0,89%	-0,93%	$3,47 \cdot 10^{-05}$	$3,47 \cdot 10^{-05}$	$3,47 \cdot 10^{-05}$	0,02%	0,06%

Выводы

Рассмотрена упрощенная теоретическая модель, описывающая процесс воспламенения газозвеси твердого горючего, диспергированного в смеси газообразных горючего и окислителя.

Показано, что критические условия воспламенения гибридной газозвеси могут быть найдены методом диаграммы Семенова.

Предложено выражение для расчета максимального стационарного разогрева газозвеси, которое с приемлемой для практических расчетов точностью аппроксимирует зависимости этой величины от основных параметров задачи.

Показано, что в зависимости от соотношения энергий активации газовой и гетерогенной реакций ε_{21} максимальный предвоспламенительный разогрев θ_p^{kr} лежит в интервале $1 < \theta_p^{kr} < 1/\varepsilon_{21}$ при $\varepsilon_{21} < 1$ и $1/\varepsilon_{21} < \theta_p^{kr} < 1$ при $\varepsilon_{21} > 1$.

Определена область изменения параметра τ_{21} , то есть отношения характерных времен тепловыделения параллельных реакций, внутри которой вклад обеих реакций в предвоспламенительный разогрев сопоставим и потому определяет критическое значение параметра Семенова α_{kr}^{hd} .

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Украины: грант № 12-14-486).

Литература

1. Hertzberg, M., Cashdollar, K. L. Introduction to dust explosions // Industrial Dust Explosions. Proc. Symposium on Industrial Dust Explosions. Ballimore: ASTM STP 958. -1987. - P. 5-32.
2. Калинчук В.В., Двоишников В.А., Виленский Т.В. Математическое моделирование горения взвеси частиц. Ч.1. Физико-математическая модель // Сб. "Физика аэро-

дисперсных систем". -1986. -№29. -С. 24 - 29.

3. Landman G.V.R. Ignition behaviour of hybrid mixtures of coal dust, methane, and air // The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy. -1995. -№1. -Р. 45 - 50.

4. Федоров А.В. Воспламенение газозвесей в режиме взаимодействующих континуумов // ФГВ. -1998. -Том 34. -№4. -С.57 - 64.

5. Гостеев Ю.А., Федоров А.В. Воспламенение газозвеси частиц угля. Точечное приближение // ФГВ. -2001. -Том 37. -№6. -С.36 - 45.

6. Крайнов А.Ю. Баймлер В. А. Критические условия воспламенения искрой смеси газообразных окислителя и горючего с реагирующими частицами // ФГВ. -2002. -№ 3. -С. 30 - 36.

7. Нигматулин Р.И. Динамика много-

фазных сред. -М.: Наука, 1987. -Том 1. -359 с.

8. Клячко Л.А. Воспламенение совокупности частиц при гетерогенной реакции // Теплотехника. -1966. -№ 8. -С. 65 - 68.

9. Руманов Э.Н., Хайкин Б.И. Критические условия самовоспламенения совокупности частиц // ФГВ. -1969. -№ 1. -С. 129-136.

10. Лисицын В.И., Руманов Э.Н., Хайкин Б.И. О периоде индукции при воспламенении совокупности частиц // ФГВ. -1971. -№ 1. -С. 3 - 9.

11. Франк-Каменецкий Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. -М.: Наука, 1987. -491 с.

12. Мержанов А.Г., Барзыкин В.В., Абрамов В.Г. Теория теплового взрыва: от Н.Н. Семнова до наших дней // Химическая физика. -1996. -Том 15. -№ 6. -С. 3 - 44.

IGNITION OF HYBRID SISTEM. I. CRITICAL CONDITIONS

Ya.I. Vovchuk, O.S. Rogulskaya, O.V. Simulina

Mechnikov Odessa National University
Institute of Combustion and Advanced Technologies
Ukraine, Dvoryanskaya str., 2, Odessa, 65082

Abstract

The work is devoted to the theoretical determination of the critical conditions for hybrid dust self-ignition and their dependencies on macroscopic and kinetic parameters of the dispersed system. Applying a quasi-stationary approximation to determine the maximum subcritical heating up and critical Semenov's parameter value for hybrid dusts is discussed in this paper. It is shown by the Semenov's method that the self-ignition limits for hybrid dust depend not only on the collective parameter, which is given by the surfaces of heterogeneous reaction heat release and heat losses, as it takes place for a single-component dust, but also on the ratio of the characteristic times and the activation energies of homogeneous and heterogeneous reactions. Approximate expression for maximum dimensionless heating up of the system calculating is proposed. The results of numerical and analytical calculations are submitted. The ranges of parameters where hybrid dust self-ignition is determined by the simultaneous contributions of heterogeneous and homogeneous reactions are quantified.

ТҮТАТУ ГИБРИДТІ ЖҮЙЕ. I. МАҢЫЗДЫ ШАРТТАРЫ

Я.И. Вовчук, О.С. Рогульская, О.В. Симулина

Жану институты және дәстүрлі емес технологиялары
И.И. Мечников атындағы Одесса ұлттық университеті
Дворянская к-сі, 2, Одесса қ., 65082 Украина

Аннотация

Жұмыс қатты жағармайдың гибритті газозвесті бөлшектерінің өздігінен тұтану сын шарттарына және олардың макроскопиялық және кинетикалық дисперті жүйесінің параметрлеріне тәуелділігіне арналған. Н. Н. Семёновтың диаграмма әдісімен гибритті газозвестің өздігінен тұтану шектері гетерогенді реакция кезіндегі жазықтықтардың және газозвестің жылу қайтаруы қатынасымен беріледі. Дисперсті жүйенің өлшемсіз қыздыруын есептеу үшін тұтану шегіндегі аппроксимационды өрнектеледі. Аналитикалық және сандық есептеулер нәтижелері ұсынылған. Гибритті гаозвестің параметрлерінің өзгеру диапазоны анықталған. Мұнда тұтану жүйені өзін-өзі жылыту гетерогенді сондай гомогенді реакцияларға бірге үлес қосуы анықталады.