

3. Л. Г. Страковский, И. И. Улеков, Е. И. Фролов.— В сб.: Горение конденсированных систем. Черноголовка, 1977.
4. В. Н. Вилюнов. ФГВ, 1966, 2, 2.
5. А. А. Ковальский, С. С. Хлевной, В. Ф. Михеев. ФГВ, 1967, 3, 4.
6. А. Э. Аверсон, В. В. Барзыкин, А. Г. Мержанов. Докл. АН СССР, 1968, 178, 1.
7. T. J. Ohlemiller, M. Summerfiels. AIAA, 1968, 6, 5.
8. A. G. Merzhanov, A. E. Averson. Comb. and Flame, 1971, 16, 89.
9. В. Н. Вилюнов, С. С. Хлевной. ФГВ, 1974, 10, 4, 512.
10. В. В. Барзыкин, С. И. Худяев. Докл. АН СССР, 1966, 169, 6.
11. Д. А. Франк-Каменецкий. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. М., Наука, 1967.
12. А. В. Лыков. Тепломассообмен. Справочник. М., Энергия, 1971.
13. К. К. Андреев. Термическое разложение и горение взрывчатых веществ. М., Наука, 1966.
14. Октоген — термостойкое взрывчатое вещество. М., Недра, 1975.
15. А. Ф. Беляев. Горение, детонация и работа взрыва конденсированных систем. М., Наука, 1968.
16. Краткий справочник по прострелочно-взрывным работам в скважинах. М., Недра, 1970.
17. И. Г. Ассовский, А. Г. Истратов, О. И. Лейпунский. Докл. АН СССР, 1978, 239, 3.
18. И. Г. Ассовский. ФГВ, 1973, 9, 6.
19. В. А. Диткин, А. П. Прудников. Справочник по операционному исчислению. М., 1965.
20. В. Н. Вилюнов, О. Г. Сидонский. ФГВ, 1965, 1, 4.

### КРИТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ВЗВЕСИ КОНГЛОМЕРАТОВ И ЧАСТИЦ БОРА

*А. Н. Золотко, Д. И. Полищук, А. И. Швец*

*(Одесса)*

В настоящее время большинство реальных схем подачи порошка твердого горючего в камеру сгорания не обеспечивает полной дезагрегации твердого компонента [1]. Это обстоятельство приводит к тому, что в реакционном объеме энергетической установки образуется газовзвесь конгломератов и частиц твердого горючего. Такая же система (взвесь конгломератов и частиц) может реализоваться при производстве и транспортировке порошкообразных материалов. Как известно, конгломераты и взвеси частиц обладают меньшими температурами воспламенения, чем одиночные частицы, поэтому изучение процессов воспламенения взвесей конгломератов и частиц представляет определенный практический интерес.

Рассмотрим воспламенение взвеси конгломератов и частиц бора. Для описания воспламенения такой взвеси воспользуемся уже известными представлениями о воспламенении взвесей частиц бора [2] и моделью воспламенения конгломератов частиц бора в приближении равнодоступной поверхности [3]. Предположим, что взвесь состоит из отдельных частиц диаметром  $d$  и сферических конгломератов диаметром  $D_k$ , образованных отдельными частицами. При этом следует обратить внимание на то обстоятельство, что температуры частиц, конгломератов и газа вследствие различных соотношений между теплоприходом за счет химической реакции и теплоотводом для частиц и конгломератов, вообще говоря, не совпадают в предвоспламенительный период — взвесь конгломератов и частиц является трехтемпературной средой. Будем пренебрегать градиентом температур по радиусу частиц и конгломератов и выгоранием бора и окислителя в предвоспламенительный период. В связи с тем, что воспламенение одиночных частиц бора наблюдается при температурах

поверхности частиц порядка 2000 К [4, 5], при которой давление насыщенных паров В<sub>2</sub>О<sub>3</sub> чрезвычайно мало [6], разумно положить, что в предвоспламенительный период испарение борного ангидрида со всей поверхности конгломерата не препятствует диффузии окислителя в глубь конгломерата. Тогда систему теплового и массового балансов для взвеси конгломератов с равнодоступной поверхностью и частиц бора можно записать в виде

$$\frac{1}{6} c \rho_K D_K \frac{dT_K}{dt} = \frac{D_K \rho_K}{d\rho} [qW_0(T_K) - lW_n(T_K)] - \alpha_K(T_K - T_r) - \varepsilon_K \sigma (T_K^4 - T_c^4), \quad (1)$$

$$\frac{1}{6} c \rho d \frac{dT}{dt} = qW_0(T) - lW_n(T) - \alpha(T - T_r) - \varepsilon \sigma (T^4 - T_c^4), \quad (2)$$

$$c_r \rho_r \frac{dT_r}{dt} = \pi D_K^2 \alpha_K N_K (T_K - T_r) + \pi d^2 \alpha N (T - T_r) - \alpha_c S (T_r - T_c) / V_c, \quad (3)$$

$$\rho_{ок} \frac{d\delta}{dt} = W_0(T) - W_n(T), \quad (4)$$

$$\rho_{ок} \frac{d\delta_K}{dt} = W_0(T_K) - W_n(T_K) \quad (5)$$

с начальными условиями

$$t = 0, T = T_K = T_0, T_r = T_{r0}, \delta = \delta_K = \delta_0,$$

где  $T, T_K, T_r, T_c$  — температуры частиц, конгломератов, газа и стенки сосуда соответственно;  $\rho, \rho_K, \rho_{ок}, \rho_r$  — плотности бора, конгломерата, окиси бора и газа;  $q, l$  — теплота образования и испарения окиси бора;  $\alpha, \alpha_K, \alpha_c$  — коэффициенты теплоотдачи от частиц в газ, от конгломератов в газ и от газа в стенку сосуда;  $W_0(T), W_n(T)$  — скорости образования и испарения окиси бора;  $\varepsilon_K, \varepsilon$  — коэффициенты черноты конгломерата и частицы;  $\sigma$  — постоянная Стефана — Больцмана;  $N_K, N$  — число конгломератов и частиц в единице объема взвеси;  $S, V_c$  — поверхность и объем реакционного сосуда;  $c_r, c$  — удельные теплоемкости газа и бора;  $\delta, \delta_K$  — толщина окисной пленки на отдельных частицах и на частицах, составляющих конгломерат;  $t$  — время. Уравнения (1)–(3) описывают изменение теплосодержания конгломерата, частицы и газа; уравнения (4) и (5) — изменение толщины окисной пленки на отдельных частицах и частицах, составляющих конгломерат.

Система уравнений (1)–(5) допускает стационарное решение, исследование которого на устойчивость, проведенное с целью получения критических условий воспламенения, приводит к очень громоздким и плохо поддающимся анализу выражениям. Поэтому проведем некоторые упрощения исходной системы уравнений. Для этого сравним количество тепла, выделяемого в ходе предвоспламенительного процесса отдельно конгломератами и частицами. Поскольку тепловыделение при гетерогенной реакции пропорционально поверхности реагирующей системы, определим отношение суммарной поверхности всех конгломератов (с учетом равнодоступности) к суммарной поверхности всех отдельных частиц взвеси. Вводя обозначения  $\beta = N_K / (N_K + N)$ ,  $\varphi = \rho_K / \rho$ ,  $\xi = D_K / d$ , получим искомое отношение поверхностей

$$\Delta = \beta / (1 - \beta) \cdot \varphi \xi^3. \quad (6)$$

Если (6) много больше единицы, то представляется возможным пренебречь тепловыделением на отдельных частицах; если  $\Delta \ll 1$ , можно пренебречь тепловыделением от конгломератов и свести задачу к модели воспламенения взвеси частиц бора [2].

Проведем оценку  $\Delta$  для результатов диспергирования, реализующихся в лабораторном эксперименте:  $\beta = 0,2$ ,  $\varphi = 0,3$ ,  $\xi = 5$ . В этом случае

$\Delta = 9,3$ , т. е. поверхность отдельных частиц составляет примерно 10% полной реакционной поверхности взвеси. Отсюда следует, что тепловым вкладом от отдельных частиц можно в данном случае пренебречь. При проведении дисперсного микроскопического анализа различных порошков бора наблюдались и большие значения  $\beta$  и  $\xi$ , что лишь увеличивает  $\Delta$ .

Используя это обстоятельство ( $\Delta \gg 1$ ), упростим исходную систему уравнений следующим образом: исключим уравнения (2) и (4), а в (3) положим, что температура отдельных частиц совпадает с температурой газа. Тогда система уравнений, описывающих воспламенение взвеси конгломератов и частиц, примет следующий вид:

$$\frac{1}{6} c \rho_k D_k \frac{dT_k}{dt} = \varphi \xi [q W_0(T_k) - l W_n(T_k)] - \alpha_k (T_k - T_g) - \varepsilon_k \sigma (T_k^4 - T_c^4), \quad (7)$$

$$(cm + c_g m_g) \frac{dT_g}{dt} = \pi D_k^2 \alpha_k N_k V_c (T_k - T_g) - \alpha_c S (T_g - T_c), \quad (8)$$

$$\rho_{ок} \frac{d\delta_k}{dt} = W_0(T_k) - W_n(T_k), \quad (9)$$

где  $m$ ,  $m_g$  — общая масса отдельных частиц и газа соответственно. Полученная система (7)–(9) подобна системе уравнений, описывающей воспламенение взвеси частиц бора [2]. Разница заключается в том, что (7) описывает изменение энтальпии частицы бора диаметром  $D_k$  с плотностью, в  $1/\varphi$  раз меньшей плотности бора, и с поверхностью  $\pi \xi D_k^2$ , где  $\xi > 1$  ( $\varphi < 1$ ); при этом теплоотдача происходит с поверхности  $\pi D_k^2$ .

Исследование стационарного решения этой системы на устойчивость дает возможность получить критические условия воспламенения взвеси конгломератов и частиц бора

$$\left. \begin{aligned} (q-l) \xi \varphi W_n(T_k) &= \frac{\alpha_k}{1+A} (T_k - T_c) + \varepsilon_k \sigma (T_k^4 - T_c^4), \\ (q-l) \xi \varphi \frac{l_n}{RT_k^2} W_n(T_k) &= \frac{\alpha_k}{1+A} + 4\varepsilon_k \sigma T_k^3. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Если не учитывать теплообмен излучением, входящий в закон испарения окиси, и провести разложение экспоненты [7], то эти условия можно представить в виде

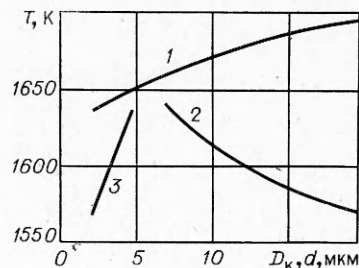
$$(q-l) \xi \varphi \frac{l_n}{RT_c^2} W_n(T_c) = \frac{\alpha_k}{e(1+A)} \quad (11)$$

где  $A = \left(1 + \frac{1}{\Delta}\right)^{-1} \frac{C \text{Nu}}{\rho_k \text{Nu}_c} \left(\frac{D_c}{D_k}\right)^2$ ;  $l_n$  — энергия активации в законе испарения окиси;  $R$  — универсальная газовая постоянная;  $C$  — массовая концентрация взвеси;  $\text{Nu}$ ,  $\text{Nu}_c$  — числа Нуссельта для  $\alpha_k$  и  $\alpha_c$ ;  $D_c$  — характерный размер сосуда.

Проанализируем выражения (10) и (11) с целью отыскания основных закономерностей воспламенения взвеси конгломератов и частиц. Рассмотрим зависимость температуры воспламенения от массовой концентрации взвеси. Поскольку коллективный параметр  $A$  растет с увеличением массы взвеси при постоянных  $d$  и  $D_k$  как для взвеси частиц, так и для рассматриваемой системы, эффективный коэффициент теплоотдачи от конгломератов в среду  $\alpha_{эф} = \alpha_k / (1+A)$  уменьшается, что приводит к падению температуры воспламенения. Особый интерес представляет зависимость критической температуры воспламенения от параметров конгломератов при постоянной массовой концентрации взвеси. При рассмотрении зависимости критической температуры воспламенения от внешнего размера конгломерата имеются два конкурирующих фактора: для одиночного конгломерата увеличение его размера приводит к снижению температуры

Рис. 1. Зависимость критической температуры воспламенения взвеси от размера конгломератов и частиц.

1 — взвесь монолитных частиц;  
2, 3 — взвесь конгломератов и частиц,  
 $\beta=0,3$ ,  $\varphi=0,3$ ,  $d=2$  мкм;  
3 —  $D_K=20$  мкм.



воспламенения, так как при этом растет его реакционная поверхность и уменьшается индивидуальный коэффициент теплоотдачи  $\alpha_k$ ; с другой стороны, в условиях взвеси увеличение размера конгломерата приводит к уменьшению коллективного параметра  $A$  и к увеличению температуры воспламенения. Совместное действие этих факторов приводит к тому, что изменение размера конгломерата не меняет расчетную температуру воспламенения в том случае, когда не учитывается теплообмен излучением. В самом деле, положив  $A \gg 1$  (реализуется для взвеси) и учитывая зависимость  $\alpha_k \sim 1/D_k$ , нетрудно показать, что критические условия воспламенения не зависят от размера и плотности конгломерата и совпадают с критическими условиями воспламенения взвеси частиц бора [2], из которых состоят конгломераты.

При учете теплотерь излучением картина меняется. На рис. 1 представлены расчетные зависимости критической температуры воспламенения взвеси от размера конгломератов и частиц при постоянной массовой концентрации взвеси 120 мг/л с учетом теплотерь излучением. При расчетах использовались те же значения физических величин, что и в [2], и закон испарения окиси бора, предложенный в [4]. Как показывают результаты расчета, взвеси конгломератов и частиц воспламеняются при температурах, меньших критической температуры воспламенения взвесью монолитных частиц. Уменьшение температуры воспламенения с ростом размера конгломерата и уменьшением размера частиц (т. е. с ростом  $\xi$ ) объясняется увеличением реакционной поверхности конгломератов и уменьшением суммарной поверхности взвеси, с которой происходит лучистая теплоотдача. При этом размер частиц является сильным параметром (см. рис. 1, 3), а размер конгломератов — более слабым (см. рис. 1, 2). Тенденция к превышению температуры воспламенения взвеси конгломератов и частиц температуры воспламенения взвеси монолитных частиц (см. рис. 1, 1) имеет место при  $\Delta \approx 1$ , где предложенная модель неприменима. Что касается зависимости критических условий воспламенения от плотности конгломератов (в случае учета теплотерь излучением), то температура воспламенения уменьшается с ростом  $\varphi$ , и это также связано с уменьшением излучающей поверхности взвеси.

Полученные критические условия воспламенения взвеси конгломератов и частиц бора в соответствующих предельных случаях совпадают с критическими условиями воспламенения одиночной частицы бора ( $\xi = 1$ ,  $\varphi = 1$ ,  $A = 0$ ) [5] и взвеси монолитных частиц бора ( $\xi = 1$ ,  $\varphi = 1$ ,  $\beta = 1$ ) [2]. При предельном переходе к взвеси частиц равенство  $\beta = 1$  следует понимать как то, что источниками тепла во взвеси являются частицы, а конгломераты отсутствуют.

Экспериментальные исследования критических условий воспламенения взвеси конгломератов и частиц бора проводились в воздушной среде по методике, изложенной в [2]. Результаты исследования зависимости критической температуры воспламенения от массовой концентрации взвеси частиц и конгломератов вместе с расчетными кривыми представлены на рис. 2. Как и следовало ожидать, критическая температура воспламенения падает с ростом массовой концентрации взвеси, при этом результаты эксперимента лежат в основном между расчетными кривыми для взве-

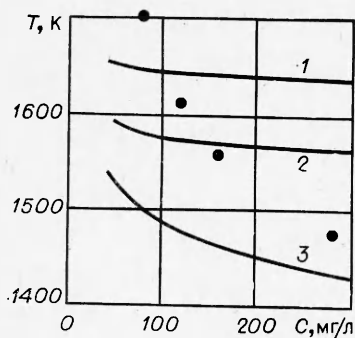


Рис. 2. Зависимость критической температуры воспламенения взвеси конгломератов и частиц от массовой концентрации металла;  $d=2,6$  мкм; точки — эксперимент.

1 — взвесь монолитных частиц с учетом излучения; 2 — взвесь конгломератов и частиц с учетом излучения,  $\beta=0,3$ ,  $\phi=0,3$ ,  $\xi=10$ ; 3 — взвесь монолитных частиц без учета излучения.

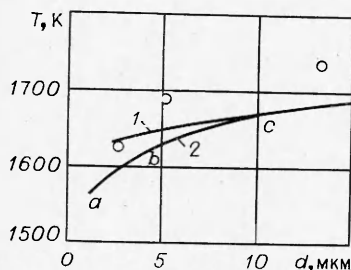


Рис. 3. Зависимость критической температуры воспламенения от размера частиц взвеси; точки — эксперимент.

температуры воспламенения с уменьшением размера частиц взвеси, чем расчет, проведенный в предположении о том, что конгломераты во взвеси отсутствуют.

В заключение авторы считают приятным долгом поблагодарить В. Г. Шевчука за полезную дискуссию и ценные замечания.

Поступила в редакцию  
15/II 1979

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В. В. Недин, О. Д. Нейков и др. Взрывоопасность металлических порошков. Киев, Наукова думка, 1971.
2. А. Н. Золотко, Л. А. Клячко и др. ФГВ, 1977, 13, 1, 38.
3. В. Г. Шевчук, А. Н. Золотко, Д. И. Полищук. ФГВ, 1975, 11, 2, 218.
4. M. K. King. Comb. Sci. and Tech., 1974, 8, 225.
5. Д. И. Полищук, А. Н. Золотко, В. Г. Шевчук. О воспламенении частиц бора. Archivum termodinamiki i spalania, 1976, 7, 4, 81.
6. Термодинамические свойства индивидуальных веществ. Т. 2. Под ред. В. П. Глушко. М., Изд-во АН СССР, 1962.
7. Д. А. Франк-Каменецкий. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. М., Наука, 1967.