

## ВОСПЛАМЕНЕНИЕ ДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМ ПРИ СТАДИЙНЫХ ПРОЦЕССАХ НА ИХ ПОВЕРХНОСТИ

А. Н. Золотко, Я. И. Вовчук, Т. А. Яровой

Институт горения и нетрадиционных технологий, Одесский национальный университет,  
65026 Одесса, Украина

На примере решения задачи о воспламенении газовзвеси частиц бора в смеси кислорода и водяного пара иллюстрируется возможность смягчения условий воспламенения твердого горючего, имеющего на поверхности труднопроницаемое для окислителя оксидное покрытие. Снижение температуры воспламенения такого горючего достигается за счет активного газообразного реагента, способного вступить в химическую реакцию с оксидной пленкой и преобразовать ее в продукты, не обладающие блокирующими свойствами. Расчет показал, что если удаление пленки  $B_2O_3$ , мешающей воспламенению частиц, происходит только в результате ее испарения, то температуры воспламенения частиц высоки. Газификация оксида водяным паром существенно ускоряет удаление пленки, что приводит к снижению температур воспламенения по сравнению с сухой средой. Эксперимент подтвердил справедливость расчета. Эффект проявляется тем сильнее, чем выше реакционная поверхность реагирующей системы. Из анализа стационарных решений системы уравнений на устойчивость к малым возмущениям получено критическое условие воспламенения газовзвеси частиц. Показано, что существует оптимальное соотношение окисляющих компонентов, при котором реализуется минимальная температура воспламенения взвеси.

### ВВЕДЕНИЕ

Многие перспективные твердые горючие, реагируя с кислородом, образуют на своей поверхности защитные покрытия. Это характерно для многих металлов, а также зольных углей. В последнем случае роль оксидного покрытия играет зольная оболочка, постепенно формирующаяся на поверхности реагирующих частиц угля. Она представляет собой смесь различных оксидов, составляющих неорганическую часть угля и оказывающихся на поверхности угольных частиц по мере выгорания углерода.

Как показано в работах по воспламенению и горению металлов (например, бора, алюминия и др.) [1–3], оксидные защитные пленки существенно влияют на скорость подвода окислителя к реакционной поверхности горючего, замедляя ее переводом процесса реагирования в диффузионный по пленке режим. В результате значительно увеличивается температура воспламенения дисперсной системы, приближаясь к температурам фазовых превращений оксидов.

Если при реагировании горючего на его поверхности образуется пористый оксидный или зольный слой, снижение скорости диффузии окислителя к реакционной поверхности не

критично. Однако если до воспламенения на поверхности горючего достигаются температуры, при которых оксид или зола начинают переходить в жидкое состояние, то отдельные капли оксида, сливаясь, могут образовывать сплошную, труднопроницаемую для окислителя пленку. Такое фазовое превращение поверхностного покрытия исследовано на примере золы в работе [4]. Естественно, что эффект блокирования поверхности угля пленкой жидкой золы проявляется тем сильнее, чем выше зольность угля. В итоге, по экспериментальным данным этой работы, температуры воспламенения газовзвесей углей с зольностью 4 и 40 % (при прочих равных условиях) различается на  $800 \div 900$  К.

Для избавления от блокирующего воздействия оксидного покрытия на реакционной поверхности частиц предлагались различные методы. Их суть — в удалении или нейтрализации пленок за счет испарения (оно, однако, происходит самопроизвольно при повышении температуры окружающей среды), применения сплавов металлов, поверхностно-активных веществ, различных присадок, препятствующих образованию сплошных пленок или приводящих к снижению температур их фазовых превращений [5–7]. В ряде случаев достигался положительный результат, например, при

использовании различных видов сплавов типа ПАМ (порошок алюминиево-магнийевый), при нанесении на поверхность металлических частиц органических покрытий [8] и т. д. Однако во всех успешных случаях требовалось серьезное изменение технологии производства порошка горючего, что достаточно сложно и дорого.

На наш взгляд, интересен и перспективен иной подхода: введение в газовую окислительную среду химически активных компонентов, которые способствуют удалению или преобразованию оксидных (или зольных) покрытий, вступая с ними в химическую реакцию (даже эндотермическую). Продуктами такого взаимодействия должны быть либо пористые, либо газообразные соединения, что обеспечивает относительно свободный доступ окислителя (кислорода) к реакционной поверхности и соответственно приведет к снижению температуры воспламенения горючего и интенсификации его сгорания.

Покажем эффективность такого способа инициирования воспламенения твердого горючего на примере задачи о воспламенении газозвеси частиц бора в смеси двух окислителей: кислорода и водяного пара.

## МЕХАНИЗМ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ БОРА

Порошкообразный бор является перспективным горючим компонентом целого ряда смесевых систем. Оценка эффективности его использования требует, прежде всего, информации о механизме воспламенения порошка бора в различных окислительных средах. Этой проблеме посвящен ряд работ [1, 9–11], в которых внимание уделено наиболее активным окислителям — кислороду и водяному пару. Однако рассматривались либо одиночные частицы, либо воспламенение в одной из сред [12].

Экспериментальные и теоретические исследования воспламенения дисперсных систем бора в сухих кислородсодержащих средах, выполненные за последние 25 лет, выявили следующую схему процесса: прогрессирующий самопрогрев частиц с параллельным образованием и испарением оксидной пленки  $B_2O_3$ , причем оксидная пленка затрудняет доступ окислителя к поверхности, что делает температуру воспламенения дисперсных систем бора сравнительно высокой; полное испарение оксида, которое отождествляется с воспламенением частиц; температура последних резко возрастает

и происходит переход к горению частиц на свободной от оксидной пленки поверхности.

Что касается воспламенения бора в смесях водяного пара с кислородом, то и здесь блокирующее влияние поверхностной пленки  $B_2O_3$  сохраняется, однако есть и отличия в протекании процесса по сравнению с сухими кислородсодержащими средами. В смесях водяного пара с кислородом воспламенение бора существенно интенсифицируется. По мнению авторов работ [9, 13], водяной пар удаляет пленку  $B_2O_3$  с поверхности частиц в результате эндотермической реакции  $B_2O_3 + H_2O$  с образованием летучей метаборной кислоты  $HBO_2$ .

В литературе известны попытки количественного описания воспламенения частиц бора во влажных средах [1, 9, 10, 14]. Однако ни одна модель не подходит к случаю, когда окислитель — чистый водяной пар. Кроме того, не исследована роль соотношения компонентов в среде; не определена область параметров (температура среды, размер частиц), при которых роль газификации  $B_2O_3$  существенна; не исследован процесс газификации при изменении реакционной поверхности воспламеняющейся дисперсной системы.

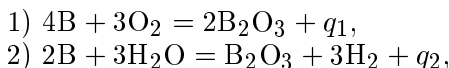
Для ответа на эти вопросы в работе предлагается модель воспламенения дисперсных систем бора в смесях водяного пара и кислорода.

## МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ВОСПЛАМЕНЕНИЯ БОРА В СМЕСИ КИСЛОРОД — ВОДЯНОЙ ПАР

Рассмотрим дисперсную систему, образованную из сферических частиц бора, для которой  $d \ll l \ll L$ , где  $d$  — диаметр частицы,  $l$  — расстояние между частицами,  $L$  — размер реакционного сосуда (печи), в котором находятся частицы горючего и смесь окисляющих газов. Это условие означает, что в системе нет ограничений доступа окислителей к частицам горючего, но в то же время имеет место тепловое взаимодействие частиц: при соотношении температур частиц и газа  $T < T_g$  газ греет частицы, при  $T > T_g$  частицы греют газ, который отдает тепло стенкам сосуда. Иными словами, рассматривается газозвесь частиц, в которой при воспламенении существенную роль играет «коллективный» эффект [15]. Обычно для таких систем  $S_r/S_h = C_B \rho_B / Ld > 1$ , где  $S_r$  — поверхности реакции,  $S_h$  — поверхности, с которой происходят теплопотери,  $C_B$  — концентрация горючего,  $\rho_B$  — плотность бора. Если концентрация горючего мала ( $S_r/S_h \rightarrow 1$ ), мож-

но говорить о воспламенении одиночной частицы. Увеличение отношения  $S_r/S_h$  стимулирует воспламенение дисперсной системы.

Будем полагать, что на поверхности индивидуальной частицы бора параллельно протекают две реакции образования жидкого оксида  $B_2O_3$ :



где  $q_1, q_2$  — тепловые эффекты соответствующих реакций. Скорость первой реакции [9]

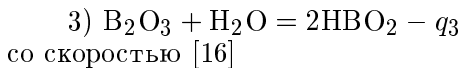
$$W_1 = (1,24 \cdot 10^{-6} \rho_{ox} T p_{O_2} / h) \exp(-22600/T).$$

Скорость второй реакции [1]

$$W_2 = (0,36 \cdot 10^{-6} \rho_{ox} T p_{H_2O} / h) \exp(-22600/T).$$

Здесь  $T$  [К] — температура частиц;  $h$  [см],  $\rho_{ox}$  [г/см<sup>3</sup>] — толщина и плотность пленки  $B_2O_3$ ;  $p_{H_2O}, p_{O_2}$  [Па] — парциальные давления газовых компонентов; размерность  $W_i$  — г/(см<sup>2</sup> · с).

Кроме того, на поверхности пленки жидкого оксида  $B_2O_3$  идет реакция газификации



$$W_3 = (2,6 p_{H_2O} / T) \exp(-6800/T)$$

и происходит испарение окиси со скоростью [1, 9]

$$W_4 = \frac{2,23 \cdot 10^9}{36TrP/DNu + \sqrt{T}} \exp\left(-\frac{44000}{T}\right)$$

где  $D$  [см<sup>2</sup>/с] — коэффициент диффузии паров  $B_2O_3$ ,  $r$  — радиус частицы,  $P = p_{O_2} + p_{H_2O}$  — полное давление;  $Nu$  — критерий Нуссельта для теплообмена газа с частицей.

При использовании допущения о равнодоупной поверхности, в пренебрежении выгоранием реагентов, излучением, градиентами температуры по радиусу частиц и координатам сосуда реагирование дисперсной системы описывается следующими уравнениями:

$$\begin{aligned} \frac{c_B \rho_B r}{3} \frac{dT}{dt} = \\ = q_1 W_1 + q_2 W_2 - q_3 W_3 - q_4 W_4 - \alpha(T - T_g), \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} m_g c_{p,g} \frac{dT_g}{dt} = \\ = 4\pi r^2 N \alpha(T - T_g) - \alpha_w S_w (T_g - T_w), \end{aligned} \quad (2)$$

$$\rho_{ox} \frac{dh}{dt} = \nu_1 W_1 + \nu_2 W_2 - \nu_3 W_3 - W_4, \quad (3)$$

где  $c_{p,g}$  — теплоемкость газа при постоянном давлении,  $c_B$  — теплоемкость бора,  $\rho$  — плотность,  $\alpha$  — коэффициент теплообмена,  $m_g$  — масса газа в реакционном объеме,  $N$  — число частиц в единице объема,  $S$  — поверхность,  $\nu_1, \nu_2, \nu_3$  — стехиометрические коэффициенты; индексы  $B, g, w$  обозначают бор, газ и стенки сосуда соответственно.

Для одиночной частицы из системы уравнений исключается уравнение разогрева газа (2). Как видно, модель дает предельные переходы для случая сухой среды ( $W_2 = W_3 = 0$ ), где в зависимости от параметров системы может реализоваться термокинетическое ( $W_4 \neq 0$ ) или теплокинетическое ( $W_4 = 0$ ) воспламенение [17]. При  $W_1 = 0$  система уравнений описывает воспламенение одиночной частицы и газозвеси частиц в среде водяного пара. Сопоставление скоростей испарения и газификации оксида показывает, что  $W_3 > W_4$  при  $T < 1600$  К. Отсюда следует, что газификация оксида существенно интенсифицирует воспламенение только тех дисперсных систем, температура воспламенения которых меньше  $1500 \div 1600$  К. К таким системам можно отнести плотные газозвеси, состоящие из частиц малых размеров, т. е. системы, для которых выполняется неравенство  $S_r/S_h \gg 1$ . Если теперь в уравнениях (1)–(3) опустить члены с  $W_4$  (предельный случай) и использовать подход Франк-Каменецкого [18] к анализу на устойчивость стационарных тепловых режимов в реагирующих гетерогенных системах, то нетрудно получить критериальное соотношение для оценки условий воспламенения газозвесей частиц бора в среде водяного пара:

$$\frac{AE_3(\nu_3 q_2 - \nu_2 q_3)}{\alpha R T_{ign}^2} W_3(T_{ign}) \approx \frac{1}{e},$$

где  $A = \frac{3}{2} \frac{c_B}{\rho_B} \frac{Nu}{Nu_w} \left(\frac{L}{d}\right)^2$ ,  $E_3$  — энергия активации реакции 3,  $T_{ign}$  — температура воспламенения взвеси,  $L$  — характерный размер системы,  $R$  — универсальная газовая постоянная.

Для дисперсных систем бора с температурой воспламенения выше  $1500 \div 1600$  К (разреженные газозвеси, состоящие из относительно крупных частиц,  $S_r/S_h \geq 1$ )  $W_3 < W_4$ . После аналогичного преобразования можно получить предельное критериальное выражение

для оценки воспламенения таких систем в среде водяного пара:

$$\frac{AE_4(\nu_3q_2 - \nu_2q_4)}{\alpha RT_{ign}^2} W_4(T_{ign}) \approx \frac{1}{e}.$$

Наиболее интересны условия воспламенения активных дисперсных систем ( $S_r/S_h \gg 1$ ) в смесях окислителей ( $O_2$ ) и паров воды. В этом случае ( $W_1, W_2 \neq 0$ ) существенна роль скорости  $W_3 \neq 0$ , а из-за низких температур воспламенения таких систем скоростью испарения оксида можно пренебречь ( $W_4 = 0$ ). Тогда анализ на устойчивость стационарных решений упрощенной системы уравнений (1)–(3) с учетом того, что  $W_1$  и  $W_2$  отличаются только числовыми множителями, дает следующее критическое условие воспламенения взвесей частиц бора в смеси окислителей:

$$\frac{AE_3}{\alpha RT_{ign}^2} \times \frac{1,24g_1(\nu_3q_1 - \nu_1q_3) + 0,36g_2(\nu_3q_2 - \nu_2q_3)}{1,24\nu_1g_1 - 0,36\nu_2g_2} \times W_3(T_{ign}) \approx \frac{1}{e}, \quad (4)$$

где  $g_i$  — массовая доля компонентов смеси.

Применим это выражение для получения численных данных по воспламенению газозвесей частиц бора во влажных средах.

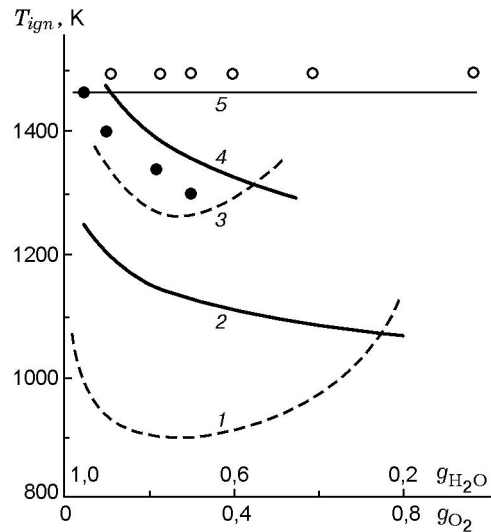
### РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА И ИХ АНАЛИЗ

Расчет проводился для взвесей со следующими характеристиками [1, 9, 10]:  $C_B = (0,6 \div 2,5) \cdot 10^{-4}$  г/см<sup>3</sup>,  $d = 1 \div 4,5$  мкм,  $p = 10^5$  Па,  $L = 3$  см. Температура воспламенения рассчитывалась как функция долей компонентов при

$$\sum_{i=1}^2 g_i = 1.$$

Результаты расчетов приведены на рисунке. Кривые 1, 3 — расчет по формуле (4). Линии 2, 4 — расчет по формуле для теплокинетического срыва с использованием значений  $W_1$  [17], когда скорость тепловыделения определяется скоростью диффузии окислителя через пленку оксида на частицах, а эффект испарения оксида не играет роли:

$$\left( \frac{3q_1 E_1}{C_B R T_{ign}^2} \right)^2 \frac{2C_B \rho_{ox} g_1}{3\lambda Nu \rho_B} W_1(T_{ign}) \left( \frac{C_B L}{\rho_B d_0} \right)^2 \approx 2,34.$$



Результаты расчетов (линии 1–5) и экспериментов (точки):

1, 3 — влажные среды ( $O_2 + H_2O$ ), расчет по формуле (4),  $d = 1$  и  $4,5$  мкм соответственно,  $C_B = 2,5 \cdot 10^{-4}$  г/см<sup>3</sup>; 2, 4 — сухие среды ( $O_2 + N_2$ ), расчет по формуле для теплокинетического срыва с использованием  $W_1$  [17],  $d = 1$  и  $4,5$  мкм соответственно,  $C_B = 2,5 \cdot 10^{-4}$  г/см<sup>3</sup>; 5 — расчет по формуле для термокинетического срыва с использованием  $W_4$  [17],  $d = 4,5$  мкм,  $C_B = 0,6 \cdot 10^{-4}$  г/см<sup>3</sup>; • — эксперимент, влажные среды ( $O_2 + H_2O$ ),  $d = 4,5$  мкм,  $C_B = 2,5 \cdot 10^{-4}$  г/см<sup>3</sup>; о — эксперимент, сухие среды ( $O_2 + N_2$ ),  $d = 4,5$  мкм,  $C_B = 0,6 \cdot 10^{-4}$  г/см<sup>3</sup>.

Линия 5 — расчет по формуле для термокинетического срыва с использованием значений  $W_4$  [17], когда воспламенение невозможно без испарения оксида и скорость тепловыделения определяется скоростью испарения оксида с поверхности частиц:

$$\frac{(q_1 - q_4) E_4 d \rho g}{Nu \lambda R T_{ign}^2} W_4(T_{ign}) = \frac{1}{(1 + A)e},$$

где  $\lambda$  — теплопроводность среды.

Кривые 4, 5 и экспериментальные точки иллюстрируют достаточность уравнений (1)–(3) для адекватного качественного и количественного описания процессов воспламенения дисперсных систем бора в сухих средах и для сопоставления с расчетами для влажных сред.

Из анализа данных, приведенных на рисунке, установлено следующее.

1. Температура воспламенения взвесей бора во влажных средах при  $g_{O_2} < 0,8$  существенно ниже, чем в сухих. Таким образом, необходимость учета эффекта газификации в средах, содержащих водяной пар, очевидна.

2. Существует оптимальное соотношение окисляющих компонентов в смеси:  $0,3\text{O}_2 + 0,7\text{H}_2\text{O}$ , при котором температура воспламенения взвеси минимальна. Снижение доли кислорода, который является более эффективным окислителем, влево от точки минимума сокращает теплоприход в реагирующую систему. Увеличение доли кислорода вправо от точки минимума вместе с увеличением тепловыделения ускоряет рост толщины пленки  $\text{B}_2\text{O}_3$  на частицах, и скорости газификации оксида не хватает для его удаления. В результате в обоих случаях температура воспламенения взвеси возрастает. При дальнейшем увеличении доли кислорода в смеси превалирующая роль роста пленки, масса которой увеличивается еще и за счет реакции бора с водяным паром, нивелирует интенсифицирующее воздействие водяного пара на процесс — температура воспламенения во влажных смесях становится выше, чем в сухих. Оценки значений скоростей образования и удаления  $\text{B}_2\text{O}_3$  вблизи «пороговых» составов смеси ( $0,77\text{O}_2 + 0,23\text{H}_2\text{O}$  для  $d = 1$  мкм и  $0,45\text{O}_2 + 0,55\text{H}_2\text{O}$  для  $d = 4,5$  мкм) подтверждает этот вывод: слева от точки пересечения зависимостей для сухих и влажных сред скорость газификации больше скорости образования окиси, справа — меньше.

3. Роль газификации снижается по мере уменьшения реакционной поверхности реагирующей системы. Так, например, из сопоставления кривых 1, 2 с кривыми 3, 4 для оптимального соотношения  $\text{O}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$  видно, что увеличение размера частиц, составляющих взвесь ( $C_B = \text{const}$ ), снижает разницу температур воспламенения для сухой и влажной сред с 230 К (кривые 1, 2) до 90 К (кривые 3, 4).

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ДЛЯ ВЛАЖНЫХ СРЕД

Экспериментальные данные по условиям воспламенения дисперсных систем бора во влажных средах крайне ограничены. Связано это, прежде всего, со сложностью постановки экспериментов в столь агрессивной среде, как высокотемпературная смесь  $\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}$ . Авторам известно только одно экспериментальное значение для точки минимума (частное сообщение С. Н. Буйновского и Л. А. Гапоненко), полученное для взвеси с параметрами  $\bar{d} \approx 1$  мкм,  $C_B = 7,2 \cdot 10^{-4}$  г/см<sup>3</sup>,  $p = 1$  атм. При вариации состава смеси минимальная температура воспламенения  $T_{ign} = 650$  К зафиксирована для

смеси  $0,3\text{O}_2 + 0,7\text{H}_2\text{O}$ . Расчет по формуле (4) для этих же условий дает  $T_{ign} = 770$  К, что неплохо согласуется с экспериментом.

Кроме того, в работе [11] при исследовании воспламенения и горения частиц бора при высоких давлениях, когда реагирование частиц происходит при наличии пленки  $\text{B}_2\text{O}_3$  на их поверхности, экспериментально показано, что даже для дисперсных систем с малой площадью реакционной поверхности (одиночных частиц) содержание в окислительной среде паров воды существенно ускоряет процесс превращения бора.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная модель воспламенения взвеси бора во влажных средах является достаточно приближенной и учитывает лишь основные физические факторы, влияющие на процесс и брутто-схему химических реакций. Расчеты проведены без учета роли конвекции, радиационных потерь, для низких давлений и т. д. Тем не менее эта простая постановка задачи позволила зафиксировать и объяснить существенное снижение температуры воспламенения в смеси окислителей по сравнению с каждым из них в отдельности и, что важно, найти оптимальное для воспламенения соотношение окисляющих компонентов. Неплохое согласование расчетов с экспериментом (к сожалению, весьма ограниченным) свидетельствует о том, что выбранная схема процесса близка к реальной.

- На примере бора показана плодотворность идеи удаления с поверхности частиц горючего оксидной пленки, блокирующей свободный доступ окислителя к реакционной поверхности, путем подбора дополнительного компонента газовой окислительной среды — для бора это пары воды. Вступая в химическую реакцию с оксидом, этот компонент переводит его в газообразное состояние, открывая тем самым реакционную поверхность горючего для окислителя. В количественном отношении удаление пленки приводит к интенсификации процесса воспламенения частиц горючего — снижению температуры воспламенения смеси и, что естественно ожидать в связи с этим, сокращению времени задержки воспламенения.

- Предполагаемый подход целесообразно, на наш взгляд, реализовывать для интенсификации процессов воспламенения и горения высокозольных углей. Не исключено, что для на-

рушения сплошности зольной оболочки достаточно предполагаемым способом удалить из ее состава несколько или хотя бы один компонент, подбирая наиболее приемлемые добавки к окислительной среде.

Авторы приносят глубокую благодарность Т. А. Яковлевой за полезные консультации и помощь в работе.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гапоненко Л. А., Буйновский С. Н., Тулупов Ю. И., Яковлева Т. А. Модель воспламенения одиночной частицы бора во влажных средах // Физика горения и взрыва. 1981. Т. 17, № 1. С. 13–19.
2. Вовчук Я. И., Золотко А. Н., Клячко Л. А., Полищук Д. И. Высокотемпературное горение неподвижной частицы бора в кислородсодержащей среде // Физика горения и взрыва. 1975. Т. 11, № 4. С. 556–563.
3. Горение порошкообразных металлов в активных средах / П. Ф. Похил, А. Ф. Беляев, Ю. В. Фролов, В. С. Логачев, А. И. Коротков. М.: Наука, 1972.
4. Киро С. А., Вовчук Я. И., Золотко А. Н., Клячко Л. А. Воспламенение частиц зольного угля // Физика горения и взрыва. 1983. Т. 19, № 5. С. 36–39.
5. Головкин В. В., Вовчук Я. И., Полищук Д. И. Горение одиночных частиц бора в хлоре // Физика горения и взрыва. 1981. Т. 17, № 5. С. 46–50.
6. 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.
7. Золотко А. Н., Киро С. А., Вовчук Я. И. Воспламенение частиц карбида бора в сухих кислородсодержащих средах // Физика горения и взрыва. 1981. Т. 17, № 6. С. 3–10.
8. Ing-Ming Shun, Tai-Kang Liu. Combustion characteristics of GAP-coated boron particles and the fuel-rich solid propellant // Combust. Flame. 1995. V. 100, N 1, march. P. 634–644.
9. King M. K. A review of studies of boron ignition and combustion phenomena at Atlantic research corporation over the past decade // Combustion of Boron-Based Solid Propellants and Solid Fuels / K. K. Kuo, R. Pien (Eds). CRC Press, 1993. P. 1–81.
10. Li S. C., Williams F. A. Ignition and combustion of boron particles // Ibid. P. 248–272.
11. Robert O. Foelsche, Rodney L. Burton, Herman Krier. Boron particle ignition and combustion at 30–150 atm // Combust. Flame. 1999. V. 117, N 1/2, april. P. 32–58.
12. Zolotko A. N. The ignition and combustion of boron dust systems // Combustion of Boron-Based Solid Propellants and Solid Fuels / K. K. Kuo, R. Pien (Eds). CRC Press, 1993. P. 455–469.
13. Macek A. Combustion of boron particles at atmospheric pressure // Combust. Sci. Technol. 1969. N 1. P. 181.
14. Meese R. A., and Skifstad J. B. Ignition and global combustion models for clouds of boron particles // AIAA Journal. 1974. N 12. P. 71–77.
15. Клячко Л. А. Воспламенение совокупности частиц при гетерогенной реакции // Теплоэнергетика. 1966. № 8.
16. Вовчук Я. И., Золотко А. Н., Клячко Л. А. и др. Газификация окиси бора // Физика горения и взрыва. 1974. Т. 10, № 4. С. 615–618.
17. Золотко А. Н., Вовчук Я. И. Воспламенение дисперсных гетерогенных систем с последовательными реакциями // Физика горения и взрыва. 1983. Т. 19, № 2. С. 10–17.
18. Франк-Каменецкий Д. А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. М.: Наука, 1967.

Поступила в редакцию 29/ХІІ 1999 г.