

где r_0 — радиус частиц; ρ_s — плотность частиц; B — массовая концентрация горючего; t_r — время горения частиц. Константа горения частиц принята равной 105 с/см^2 [12].

Полученная в оценочном расчете величина скорости 40 см/с даже без учета полноты сгорания частиц (65%) значительно ниже установленной экспериментально — 90 см/с (см. рис. 2), что свидетельствует о существенном вкладе в процесс горения аэрозвесей радиационного теплообмена.

ЛИТЕРАТУРА

1. О. И. Лейпунский. ЖХВ, 1960, 34, 1.
2. Р. А. Барлас. — В кн.: Предупреждение внезапных взрывов газодисперсных систем. Киев: Наукова думка, 1971.
3. Э. П. Руманов, Б. И. Хайкин. Докл. АН СССР, 1971, 201, 1.
4. Э. П. Руманов, Б. И. Хайкин. — В кн.: Горение и взрыв. М.: Наука, 1972.
5. K. H. Essenhigh, I. Csaba. 9-th Symp. (Intern.) on Comb. N. Y., Academic, 1963.
6. О. М. Тодес, А. Д. Гольцикер и др. — В кн.: Горение и взрыв. М.: Наука, 1972.
7. D. Bhaduri, S. Bandyopadhyay. Comb. Flame, 1971, 17, 1.
8. Г. Е. Озерова, А. М. Степанов. ФГВ, 1973, 9, 5.
9. Г. Е. Озерова, А. М. Степанов. ФГВ, 1979, 15, 5.
10. К. К. Ионушас и др. ФГВ, 1979, 15, 5.
11. С. В. Горошин и др. — В кн.: Физика аэродисперсных систем. Вып. 18. Киев — Одесса: Вища школа, 1978.
12. Е. И. Кондратьев и др. — В кн.: Физика аэродисперсных систем. Вып. 19. Киев — Одесса: Вища школа, 1979.
13. С. В. Горошин и др. — В кн.: Физика аэродисперсных систем. Вып. 20. Киев — Одесса: Вища школа, 1980.
14. В. Г. Шевчук и др. ФГВ, 1982, 18, 5.
15. W. A. Strauss. AIAA J., 1968, 6, 9.
16. В. С. Сергеев и др. ФГВ, 1977, 13, 6.
17. А. М. Быков, А. Н. Прозоров. ФГВ, 1980, 16, 1.

УДК 546.36

ВОСПЛАМЕНЕНИЕ ЧАСТИЦ ЗОЛЬНОГО УГЛЯ

С. А. Киро, Я. И. Вовчук, А. Н. Золотко, Л. А. Клячко
(Одесса)

Рациональное использование зольных углей — одна из важнейших народнохозяйственных задач. Необходимым условием для ее решения является знание процессов воспламенения и горения таких горючих. Вопросам горения зольных углей в литературе уделено достаточно внимания, тогда как особенности их воспламенения практически не рассматривались. Очевидно, что организация эффективного преобразования зольных углей в энергетических установках невозможна без анализа закономерностей их воспламенения, так как время преобразования горючего есть сумма времен задержки воспламенения и горения.

Цель настоящей работы — экспериментальное исследование и теоретический анализ воспламенения зольных углей в кислородсодержащих средах.

Изучались порошки углей разных марок с зольностью $A^s = 4,5 \div 72\%$. Для выявления качественных особенностей предпламенного процесса проводилась микрокино съемка одиночных частиц угля ($d_n = 0,2 \div 2 \text{ мм}$), помещенных внутрь кварцевой трубки микропечи ($d = 2,5 \text{ мм}$, $l = 100 \text{ мм}$, $T_{\infty}^{\text{max}} = 1400 \text{ К}$), куда слабым током подавался кислород. Результаты микрокино съемки позволили обнаружить два варианта предвоспламенительного процесса. В первом случае, характерном для низзолельных углей ($A^s < 15\%$) и для всех исследованных марок углей с тугоплавкой золой. ($T_{\text{пл}}^s > T_B$), воспламенению частиц предшествовало образование пористого слоя золы (рис. 1, а), а полнота сгорания углерода составляла

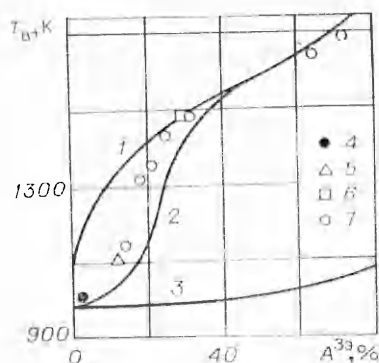
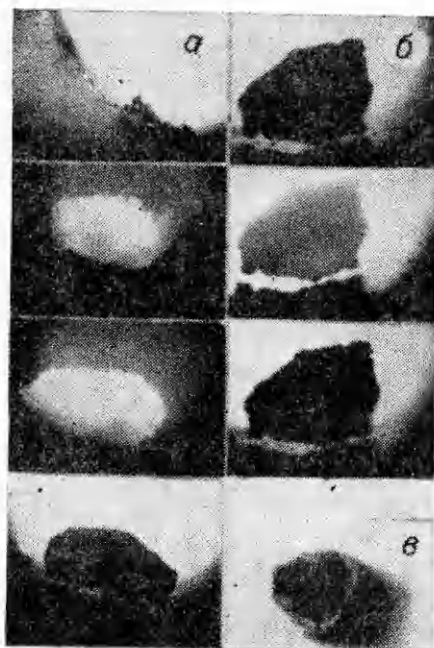


Рис. 2. Зависимость температуры воспламенения аэровзвеси частиц угля от содержания золы; $C_r = 100$ мг/л, $d_p = 7$ мкм.

Марки угля: 4 — А, 5 — АР-3, 6 — ДД, 7 — иштинский.

Рис. 1. Кинограммы (а, б) и микрофотографии среза частицы зольного угля (в).

$\eta = 90 \div 95\%$. Во втором случае для одиночных частиц высокозольных углей ($A^3 > 20\%$) с легкоплавкой золой ($T_{пл}^3 < T_v$) воспламенение не реализовано даже при максимальной температуре микропечи¹. При этом в опыте фиксировалось резкое увеличение интенсивности свечения частиц с последующим медленным остыванием до температуры среды (рис. 1, б, выгорание углерода не превышало $\eta \leq 10-15\%$). На микрофотографиях среза погасших частиц отчетливо видна сплошная оплавленная оболочка золы (рис. 1, в).

Анализ кинограмм и физико-химических характеристик исследованных углей позволяет предположить, что отмеченные различия определяются как величиной зольности горючего, так и соотношением температур срыва теплового равновесия и плавления золы. Справедливость этого предположения подтверждается результатами теста по воспламенению частиц, моделирующих зольный уголь, полученных прессованием смесей порошков активированного угля (70% по массе) и инертных добавок (30%): легкоплавкой — B_2O_3 ($T_{пл}^{B_2O_3} = 750$ К) и тугоплавкой — Al_2O_3 ($T_{пл}^{Al_2O_3} = 2350$ К). В одинаковых условиях ($m_{O_2\infty} = 1,0$, $T_\infty = 1300$ К) образцы с Al_2O_3 воспламенялись и сгорали (после выгорания углерода оставался пористый остов окисла), тогда как таблетки, содержащие окись бора, не воспламенялись, а их поверхность после опыта оказывалась покрытой сплошной оболочкой B_2O_3 .

Таким образом, для углей с низким содержанием зольных примесей либо с тугоплавкой золой пористый минеральный остаток практически не препятствует взаимодействию углерода с окислителем, а лишь уменьшает поверхность тепловыделения по сравнению с монолитной частицей. Механизм воспламенения таких горючих — тепловой [1]. Для высокозольных углей при условии $T_v > T_{пл}^3$ на частице в процессе воспламенения накапливается сплошная расплавленная окисная оболочка, вызывающая прогрессирующее кинетическое торможение окисления углерода. Тогда механизм воспламенения подобен воспламенению металлов с защитными пленками окисла, согласно классификации [2], теплокинетический.

¹ За температуру воспламенения принималась минимальная температура среды, при которой наблюдался срыв теплового равновесия с последующим горением частиц.

Воспользуемся этими представлениями о механизмах воспламенения различных зольных углей при исследовании критических условий воспламенения газовзвесей частиц угля. Эксперименты проводились в горизонтальной трубчатой печи ($T_{\infty}^{\max} = 1750$ К) [3]. На рис. 2 представлена экспериментальная зависимость температуры воспламенения угольной аэровзвеси от содержания минеральных примесей. Здесь же приведены результаты численного интегрирования системы уравнений, описывающих воспламенение газовзвеси частиц зольного угля (кривая 2):

$$\frac{\partial \Theta}{\partial \tau} = \varphi(\Theta, z) - \frac{\Theta - \Theta_r}{\Omega}, \quad \Theta(0) = \Theta_0, \quad (1)$$

$$\frac{d\Theta_r}{d\tau} = \frac{B}{1-B} \left(\frac{\Theta - \Theta_r}{\Omega} - \frac{\Theta_r - \Theta_0}{A\Omega} \right), \quad \Theta_r(0) = \Theta_0, \quad (2)$$

$$\frac{dz}{d\tau} = \frac{A^3}{1-A^3} \varphi(\Theta, z), \quad z(0) \rightarrow 0, \quad (3)$$

где $\varphi(\Theta, z) = \frac{1}{1/\varphi_1 + 1/\varphi_2}$ — безразмерная скорость тепловыделения, заданная по закону сложения сопротивлений: диффузионного по пленке золы $\left\{ \varphi_1 = \frac{\exp[\Theta/(1+\beta\Theta)]}{z} \right\}$ и кинетического $\left\{ \varphi_2 = \frac{\exp[\nu\Theta/(1+\beta\Theta)]}{\Psi} \right\}$; Θ, Θ_r, z — безразмерные температуры и толщина пленки золы; параметр $\Psi = \frac{D_0 \exp(-E/RT_*)}{h_n k_0 \exp(-E_1/RT_*)} \frac{1}{(1-A^3)\gamma}$ характеризует отношение скоростей жидкофазной диффузии и химической реакции; $\nu = E_1/E$; $\Omega, \beta, \gamma, A, B$ — параметры, известные из теории воспламенения металлов; h_n — начальная толщина пленки золы.

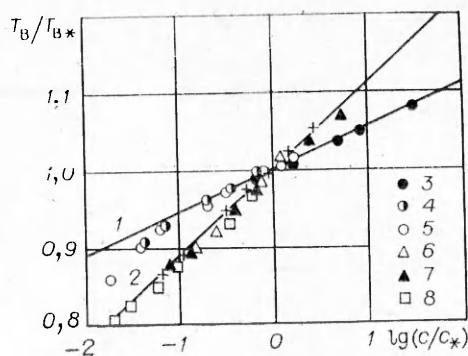
При записи системы (1)–(3) кроме общепринятых допущений предполагалось, что минеральные примеси равномерно распределены по объему частицы угля, а скорость диффузии через жидкую оболочку золы обратно пропорциональна ее толщине [4]. Значения $D_0 = 64$ см²/с и $E = 48,5$ ккал/моль в законе диффузии определены решением обратной задачи теории горения (в предположении о диффузионном контроле реакции) из экспериментальной зависимости $T_b = f(m_{O_2\infty})$ для угля марки ДД ($A^3 = 28,8\%$). Поскольку для всех исследованных горючих основным компонентом золы является SiO₂ (50–60% по массе), эти значения применялись в расчетах независимо от марки углей. Кинетические константы окисления углерода принимались равными $k_0 = 2,5 \cdot 10^7$ см/с, $E_1 = 37,8$ ккал/моль [4]. Из рис. 2 видно, что предложенная модель позволяет вполне удовлетворительно качественно и количественно предсказать поведение экспериментальной зависимости. Кроме того, модель допускает предельные переходы, отвечающие двум предельным режимам воспламенения, которые наблюдаются в эксперименте. Если суммарная скорость тепловыделения контролируется кинетикой, температура воспламенения газовзвеси может быть рассчитана по критерию срыва теплового равновесия $\delta_{кр} = \frac{\nu\Omega}{\Psi} = \frac{1}{(1+A)e}$ [5] (см. рис. 2, 3). В диффузионном по пленке золы режиме система (1)–(3) сводится к виду, аналогичному [6]. Тогда критические условия с учетом зольности определяются из условия $A \frac{B}{1-B} \Omega_{кр} \frac{1-A^3}{A^3} = 1,2$ (см. рис. 2, 1).

Сопоставление экспериментальных зависимостей температур воспламенения аэровзвесей различных углей от концентрации горючего с расчетами по указанным критериям (рис. 3) показывает, что исследованные угли по механизму воспламенения четко разделяются на две группы, каждая из которых достаточно хорошо описывается соответствующим критерияльным соотношением.

Таким образом, экспериментальное исследование воспламенения зольных углей и разработанная теоретическая модель воспламенения

Рис. 3. Зависимость температур воспламенения аэрозвешенных частиц зольных углей от концентрации горючего.

Расчет по критериям воспламенения: 1 — теплового, 2 — теплокинетического; эксперимент: 3 — $A^3 = 4,5\%$, 4 — $A^3 = 12,5\%$, 5 — $A^3 = 13,7\%$ ($T_{в*} = 1030$ К), 6 — $A^3 = 25\%$, 7 — $A^3 = 31,7\%$, 8 — $A^3 = 64\%$ ($T_{в*} = 1320$ К).



позволили установить существование двух предельных механизмов воспламенения — теплового и теплокинетического. Показано, что для углей разных марок реализация того или иного режима воспламенения определяется прежде всего значением зольности угля и соотношением критической температуры воспламенения дисперсной системы и температуры плавления минерального компонента горючего.

ЛИТЕРАТУРА

1. Д. А. Франк-Каменецкий. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. М.: Наука, 1967.
2. А. Б. Арутюнян, С. Л. Харатян, А. Г. Мержанов. ФГВ, 1980, 16, 2, 10.
3. А. Н. Золотко, Л. А. Клячко и др. ФГВ, 1977, 13, 1, 38.
4. Г. В. Виленицкий, Д. М. Хзмалян. Динамика горения пылевидного топлива. М.: Энергия, 1978.
5. Э. И. Руманов, Б. И. Хайкин. ФГВ, 1969, 5, 1, 129.
6. В. Б. Либрович, В. И. Лисицын, Б. И. Хайкин. ПМТФ, 1974, 1, 75.

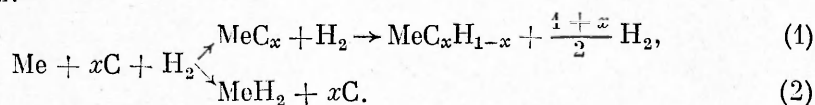
УДК 546; 547

НЕЕДИНСТВЕННОСТЬ СТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМОВ ПРИ ГОРЕНИИ СМЕСЕЙ ПОРОШКОВ ЦИРКОНИЯ И САЖИ В ВОДОРОДЕ

Н. А. Мартirosян, С. К. Долуханян, А. Г. Мержанов
(Ереван, Черногоровка)

Теоретическими исследованиями [1] показано, что в сложных системах, где химическое превращение может идти по конкурирующим направлениям, имеет место неединственность стационарных режимов горения. Какой из двух возможных в области неединственности режимов горения будет осуществляться, определяется условиями зажигания. Зажигание от источника с высокой температурой приводит к реализации высокотемпературного режима, а зажигание от источника низкой температуры — низкотемпературного режима.

Интересными объектами экспериментального исследования с точки зрения выявления неединственности являются системы типа $Me - C - H_2$, в которых возможно взаимодействие по двум взаимоисключающим направлениям:



В работе [2] на примере системы $Ti - C - H_2$ показано, что реакции (1) и (2) существенно различаются по скоростям и температурам горения, это и не позволяет им протекать одновременно. Переход от од-