

УДК 536.46

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

*Институт горения и нетрадиционных технологий  
Одесского национального университета им И.И. Мечникова*

**Воспламенение, горение и потухание частиц  
высокозольных углей. Часть III. Горение  
газодисперсных систем частиц высокозольных углей**

Разработана нестационарная теоретическая модель воспламенения и горения газозвеси частиц зольного угля, учитывающая возможность расплавления золы в процессе реагирования. Установлено, что тугоплавкая зола относительно слабо влияет на характер реагирования и времена горения взвесей частиц зольного угля в сравнении с беззольным. Расплавление золы приводит не только к существенному увеличению времени полного реагирования топлива, но и к появлению качественно новых зависимостей времени горения и средней скорости выгорания как функции массовой доли окислителя и количества зольных включений. Качественные изменения механизма реагирования угля с легкоплавкой золой появляются даже при относительно небольших значениях зольности.

В настоящей работе проведено исследование влияния золы на процесс горения газозвеси частиц зольного угля. При построении модели учтены возможности смены агрегатного состояния золы в процессе реагирования, а также изменения доли поверхности частицы угля, покрытой слоем золы.

При моделировании процесса горения газозвеси монодисперсных частиц зольного угля в сухой кислородосодержащей среде были использованы упрощающие предположения, принятые в работе [1], где рассматривалось горение одиночной частицы высокозольного угля.

Для случая газозвеси, в дополнение к уравнению теплового баланса частицы угля:

$$\begin{aligned} C_p m \frac{d(T)}{dt} = & 4 \pi r^2 (1-A) (k_1 q_1 + k_2 q_2) [a_1 \cdot (1-z) + a_2 \cdot z] \rho_g - \\ & - 4 \pi \lambda \left[ (1-z) r + z (r+h) \right] (T - T_g) - \\ & - 4 \pi \sigma \left[ \varepsilon_c (1-z) r^2 + \varepsilon_a z (r+h)^2 \right] (T^4 - T_w^4) \end{aligned}$$

и уравнению выгорания частицы угля:

$$\frac{dm}{dt} = -4\pi r^2(1-A)(k_1 v_1 + k_2 v_2)[a_1 \cdot (1-z) + a_2 \cdot z] \rho_g$$

необходимо добавить уравнение, определяющее изменение температуры газовой фазы, обусловленное теплообменом между частицами, газом и стенками реактора:

$$\frac{dT_g}{dt} = \frac{3Nu\lambda C_{ок}^0 v (r+h)(T-T_g)}{8\alpha r_0^3 \rho_f C_{pg} (1-A)} - \frac{4Nu_w \lambda (T_g - T_w)}{\rho_g L^2 C_{pg}}$$

Массовые доли кислорода на свободной от золы поверхности частицы угля  $a_1$  и на ее поверхности под слоем золы  $a_2$  определялись с учетом выгорания окислителя в предположении квазистационарности процесса диффузии окислителя к поверхности угольной частицы:

$$a_1 = \frac{a_\infty \left( 1 - \frac{\left(\frac{r}{r_0}\right)^3}{\alpha} \right)}{(k_1 + k_2) \left[ (1-A) \frac{1}{\beta} + \frac{1}{k_1 + k_2} \right]};$$

$$a_2 = \frac{a_\infty \left( 1 - \frac{\left(\frac{r}{r_0}\right)^3}{\alpha} \right)}{(k_1 + k_2) \left[ (1-A) \left( \frac{1}{\beta} + \frac{1}{\beta_A} \right) + \frac{1}{k_1 + k_2} \right]};$$

где  $m$  — масса частицы угля,  $A$  — зольность,  $\beta$  — коэффициент избытка окислителя,  $T$  — температура частицы угля,  $T_g$  — температура окружающей среды,  $T_w$  — температура стенки печи,  $r$  — радиус частицы угля,  $\Omega=1-A$  — пористость слоя золы,  $\rho_g$  — плотность газа,  $a_\infty$  — мольная доля окислителя в окисляющем газе,  $C_p$  — удельная теплоемкость угля,  $k_i$  — константа скорости химической реакции,  $E_i$  — энергия активации,  $q_i$  — тепловой эффект,  $v_i$  — стехиометрические коэффициенты,  $i=1,2$  — номер химической реакции,

$\epsilon_c$  — коэффициент черноты угля,  $\epsilon_a$  — коэффициент черноты золы,  $\sigma$  — постоянная Стефана-Больцмана,  $C_{pg}$  — теплоемкость газа,  $L$  — диаметр печи,  $Nu_w$  — критерий Нуссельта для стенок печи;  $\rho_g$  — плотность газа,  $\rho_f$  — плотность частицы,  $\beta_A = D_z/h$  — скорость диффузии окислителя через золную оболочку толщиной  $h$ ,  $\beta$  — коэффициент массообмена,  $D_z$  — коэффициент диффузии окислителя через слой золы.

Полагалось, что величина  $D_z$  не зависит от химического состава золной оболочки и определяется ее агрегатным состоянием:  $D_z = \Omega \cdot D$  для твердой золы; и  $D_z = D^* \exp(-E_a/(RT))$  для расплавленной золы, где  $D$  — коэффициент газовой диффузии;  $D^*$ ,  $E_a$  — соответственно, предэкспонент и энергия активации в температурной зависимости коэффициента диффузии кислорода сквозь жидкую золную пленку.

Приведенная система уравнений решалась численно при следующих начальных условиях —  $t=0$ :  $T=T_0$ ,  $m=m_0$ ,  $T_g=T_{g0}$ . Значения параметров задавались согласно [3-8]:

$q_1=2945$  кал/г,  $q_2=1634$  кал/г,  $k_1=0.363 \cdot 10^6$  см/с,  $k_2=0.44 \cdot 10^6$  см/с,  $E_1=24150$  кал/моль,  $E_2=25600$  кал/моль,  $v_1=0.375$ ,  $v_2=0.75$ ,  $v=1.8$ ,  $C_p=0.167$  кал/г·К,  $\rho_c=1.5$  г/см<sup>3</sup>,  $\lambda=5,5 \cdot 10^{-5}(T^*/T_0)^{0.75}$  кал/см·с·К,  $D=0.18(T^*/T_0)^{1.75}$  см<sup>2</sup>/с,  $c_g=1.29 \cdot 10^{-3}(T_0/T^*)$  г/см<sup>3</sup>,  $D^*=64$  см<sup>2</sup>/с,  $E_a=48500$  кал/моль,  $\epsilon_c=0.78$ ,  $\epsilon_a=0.40$ .

Расчет проводился до достижения полноты выгорания в 95%. Значения коэффициентов переноса определялись с учетом их зависимости от температуры при  $T^*=0.5(T+T_g)$ .

Согласно [6,7], зола считалась тугоплавкой, если температуры, достигаемые в процессе реагирования, меньше температуры размягчения золы  $T_1$ , и легкоплавкой, если температура частицы угля в процессе ее реагирования превышает температуру размягчения золы. Для углей с легкоплавкой золой была учтена возможность формирования на поверхности частицы угля очагов расплавленной золы, которые оказывают дополнительное диффузионное сопротивление диффузии окислителя.

Как показано в [1], расплавление золы в случае, когда отдельные ее капли способны сливаться и образовывать “островки” на поверхности одиночной частицы золного угля существенно затягивает процесс ее реагирования. Образование таких участков расплавленной золной пленки практически исключает определенную долю реакционной поверхности из процесса реагирования, так как скорость жидкофазной диффузии на 4-5 порядков меньше газофазной. Это в свою очередь существенно увеличивает время полного реагирования угольной частицы. Чем ниже температура начала размягчения золы, тем раньше в процессе воспламенения и горения угольной частицы на ее поверхности начинается формирование участков расплавленной золной оболочки и тем дольше протекает процесс полного реагирования.

Естественно, что при воспламенении и горении газозвесей, для которых существенен саморазогрев системы, нарастание температуры частицы угля

в составе взвеси и достижение условия расплавления золы происходит значительно быстрее, чем это имеет место для одиночной частицы. Раннее формирование жидкой пленки золы на поверхности частиц газозвеси в сравнении с одиночной частицей обуславливает в целом более медленный процесс реагирования частиц в составе взвеси (Рис. 1, кривые 1 и 2).

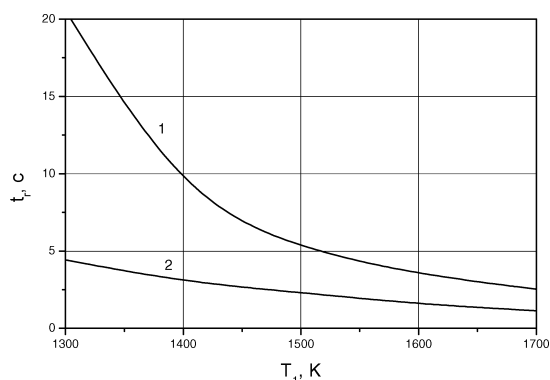


Рис. 1. Зависимость времени горения взвеси частиц угля в воздухе от температуры размягчения золы:

$r_{p0}=50\text{мкм}$ ,  $A=0.20$ ,  $r_z=0.5\text{мкм}$ ,  $T_{g0}=1400\text{К}$ ,  $\alpha=1.3$   
 1 — газозвесь частиц; 2 — одиночная частица

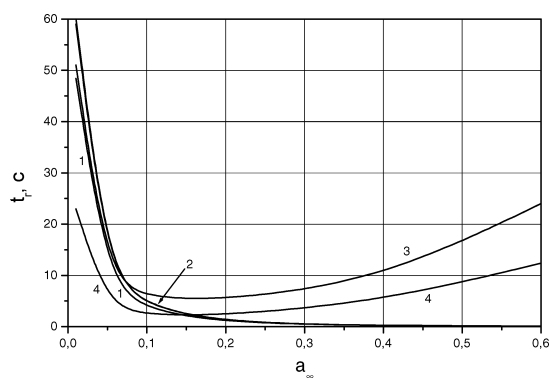


Рис. 2. Зависимость времени горения взвеси от массовой доли кислорода в среде:  $r_{p0}=50\text{мкм}$ ,  $A=0.20$ ,  $r_z=0.5\text{мкм}$ ,  $T_{g0}=1400\text{К}$ ,  $\alpha=1.3$ ,  
 1 — газозвесь, беззольный уголь; 2 — газозвесь, тугоплавкая зола; 3 — газозвесь, легкоплавкая зола; 4 — одиночная частица, легкоплавкая зола

Увеличение количества окислителя в окружающей среде при горении беззолного угля и угля с тугоплавкой золой ускоряет процесс реагирования — наблюдается характерная для гетерогенного реагирования в диффузионном режиме картина уменьшения времени горения с ростом концентрации окислителя (рис. 2, кривые 1 и 2). В случае легкоплавкой золы, рост температуры реагирования с увеличением концентрации окислителя (начиная с уровня концентраций  $\alpha = 0.15$ ), приводит к более раннему формированию на поверхности частицы расплавленного зольного покрытия, образование которого существенно снижает скорость реагирования и затягивает его время.

Процесс реагирования взвеси частиц зольного угля с тугоплавкой золой контролируется газофазной диффузией — характерное время горения ( $t_f/r_0^2$ ) практически не зависит от начального размера частицы угля (кривая 3). Для угля с легкоплавкой золой следует отметить существенно недиффузионный характер реагирования (кривая 1), однако контроль концентрации окислителя на поверхности реагирования показал, что количества окислителя там чрезвычайно малы, что нехарактерно для кинетического режима реагирования. Для более детального анализа была исследована одиночная частица с легкоплавкой золой (кривая 2). Характер поведения кривой свидетельствует о том, что для взвеси частиц угля с легкоплавкой золой существенное увеличение характерного времени с уменьшением размера частиц связано с влиянием эффекта саморазогрева частиц в составе взвеси (коллективный эффект), который приводит к возрастанию температуры частиц, и как следствие к плавлению золы и существенному увеличению времени реагирования. Т.о. расплавленная зольная оболочка лимитирует процесс диффузии окислителя к реакционной поверхности — наблюдается диффузионный по зольной пленке режим реагирования (кривая 1).

Следует отметить, что для углей с легкоплавкой золой указанное выше влияние эффекта саморазогрева обуславливает в целом более низкие скорости реагирования частиц в составе газовзвеси в сравнении с одиночной частицей (рис 1, кривые 1 и 2; рис 2, кривые 3 и 4).

Влияния изменения коэффициента избытка окислителя  $\alpha$  на относительное время горения взвеси для случаев легко- и тугоплавкой золы (рис 4, кривые 1 и 2 соответственно) особенно существенно в диапазоне значений  $\alpha$  от 1 до 1.5. Это, по видимому, объясняется существенным увеличением скорости реагирования с ростом  $\alpha$  в данном диапазоне, что обуславливает более раннее формирование расплавленного зольного каркаса и как следствие замедление процесса реагирования. Дальнейшее увеличение  $\alpha$  не приводит к существенному ускорению процесса реагирования — относительное время реагирования незначительно увеличивается.

Рост количества зольных включений увеличивает время реагирования единицы массы горючего, как для случая тугоплавкой золы (рис 5, кривая 3), так и для легкоплавкой золы (кривые 1 и 2), что объясняется уменьшением повер-

хности реагирования с ростом  $A$ , и, как следствие, общим увеличением времени горения. В случае легкоплавкой золы увеличение времени реагирования более существенно, что обусловлено тормозящим влиянием жидкой зольной оболочки. Однако начиная со значений зольности  $A=0.15-0.20$  влияние расплавленной зольной оболочки постепенно уменьшается. Это связано с уменьшением уровней температур, достигаемых в процессе реагирования и с постепенным уменьшением доли поверхности покрытой жидким зольным слоем. В пределе при  $A=0.80$  исчезают различия во временах горения для тугоплавкой и легкоплавкой золы, что является свидетельством того, что при таких зольностях в процессе реагирования не достигаются температуры плавления золы.

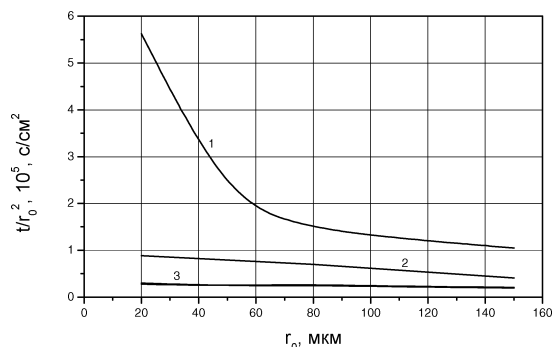


Рис. 3. Зависимость характерного времени ( $t_r/r_0^2$ ) от начального размера частицы угля в газозвеси:  
 $T_{г0}=1400\text{K}$ ,  $\alpha=1.3$ ,  $A=0.20$ ,  $r_z=0.5\text{мкм}$ ,  $a_{\infty}=0.21$ ;  
 1 — легкоплавкая зола; 2 — одиночная частица с легкоплавкой золой; 3 — тугоплавкая зола

Кривые 1 и 2 соответствуют случаям с разной дисперсностью золы. Для более мелкой золы (кривая 1) процесс реагирования протекает медленней. Это связано с тем, что чем больше дисперсность золы, тем быстрее она покрывает поверхность частицы угля и, соответственно, при достижении температуры начала плавления золы большая поверхность оказывается покрытой расплавленной зольной оболочкой.

Полученные результаты позволяют заключить, что при реагировании газодисперсных систем зольных углей тугоплавкая зола относительно слабо влияет на характер реагирования и времена горения частиц зольного угля в сравнении с беззольным. Расплавление золы приводит не только к существенному увеличению времени полного реагирования топлива, но и к появлению качественно новых зависимостей времени горения и средней скорости выгорания как функции массовой доли окислителя и количества зольных включений. Качественные изменения механизма реагирования угля появля-

ются даже при относительно небольших значениях зольности, если в процессе реагирования зола плавится. Условия, при которых происходит увеличение скорости реагирования, способствуют более раннему формированию на реакционной поверхности расплавленного зольного каркаса, что вызывает дальнейшее торможению процесса реагирования. Это также обуславливает более быстрое реагирование одиночных частиц в сравнении с газозвесью для углей с легкоплавкой золой.

Исследования, описанные в данной публикации были выполнены при поддержке гранта АФГИР № RE1-2359-CG-02

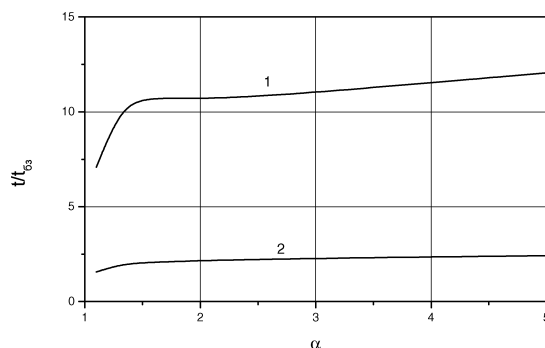


Рис. 4. Зависимость отношения времени горения взвеси зольного угля ко времени горения беззольного угля:

$T_{g0}=1400\text{K}$ ,  $A=0.20$ ,  $r_{p0}=50\text{мкм}$ ,  $r_z=0.5\text{мкм}$ ,  $a_{\infty}=0.21$ ;  
1 — легкоплавкая зола; 2 — тугоплавкая зола

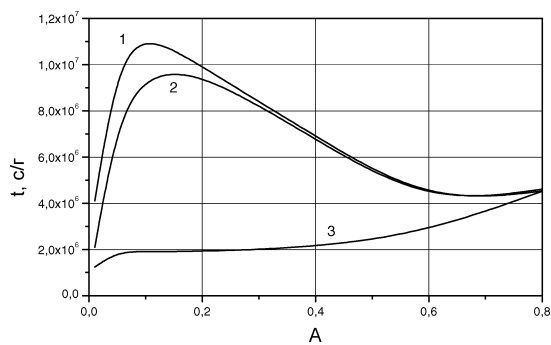


Рис. 5. Зависимость времени горения единицы массы угля от его зольности:

$T_{g0}=1400\text{K}$ ,  $\alpha=1.3$ ,  $r_{p0}=50\text{мкм}$ ,  $r_z=0.5\text{мкм}$ ,  $a_{\infty}=0.21$ ;  
1 — легкоплавкая зола; 2 — легкоплавкая зола,  $r_z=1.0\text{ мкм}$ .;  
3 — тугоплавкая зола.

### Литература

1. Яровой Т.А., Вовчук Я.И., Золотко А.Н., Полетаев Н.И. Воспламенение, горение и потухание частиц высокозольных углей. Часть II. Горение одиночной частицы высокозольного угля // *Физика аэродисперсных систем*. — 2001. — №38. — С. 71-81.
2. Калинин В.В., Орловская С.Г., Прудникова Ю.В., Гануи И. Устойчивые и критические режимы тепломассообмена движущейся углеродной частицы. // *Физика горения и взрыва*. — 1998. — №1. — С. 25-31.
3. Гуревич М.А., Озерова Г.Е., Степанов А.М., Расчет гетерогенного воспламенения совокупности частиц // *Физика горения и взрыва*. — 1971. — №1. — С. 3-9.
4. Основы практической теории горения / Под ред. В.В.Померанцева. — Л.: Энергия, 1973.
5. Канторович Е.В. Основы теории горения и газификации твердых топлив. — М.: АН СССР, 1958. — 599 с.
6. Киро С.В. Критические явления в дисперсных гетерогенных системах со стадийным образованием конечных продуктов: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. — Одесса, 1983. — 153 с.
7. 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.
8. Виленский Т.В., Хзмалян Д.М. Динамика горения пылевидного топлива. — М.: Энергия, 1978. — 248 с.
9. Лавров П.В., Шурыгин А.П. Введение в теорию горения и газификации топлива. — М.: АН СССР, 1962.
10. Бабий В.И., Куваев В.Ф. Горение угольной пыли и расчет пылеугольного факела. — М.: Энергоатомиздат., 1986.
11. Вулис Л.А. О горении зольного угля // *Журнал технической физики*. — 1940. — №10. — Вып.23-24.
12. Юдович Я.Э. Геохимия ископаемых углей. — Л.: Наука, 1978.
13. Агроскин А. А. Химия и технология угля. — М.: Недра, 1969.
14. Белосельский Б.С., Барышев В.И. Низкосортные энергетические топлива. — М.: Энергия, 1978. — 211 с.
15. Hurt R.H., Davis K.A. Near-Extinction and Final Burnout in Coal Combustion // *Twenty-Fifth (International) Symposium on Combustion*. The Combustion Institute. — Pittsburgh, 1994.
16. Hurt R.H., Davis K.A., Yang N.Y.C., Headley T.H., Mitchell R.E. Residual Carbon from Pulverised Coal Fired Boilers 2: Morphology and Physicochemical Properties // *Fuel*. — 1995. — V. 74, № 9. — P. 1297-1306.
17. Золотко А.Н. Теория воспламенения. — Одесса, 1985.



*Т. А. Яровий, А. Н. Золотко, Я. І. Вовчук, М. І. Полетаєв*  
**Займання, горіння і потухання частинок високозольного вугілля.  
Частина III. Горіння газодисперсних систем частинок  
високозольного вугілля**

**АНОТАЦІЯ**

Розроблено нестационарну теоретичну модель запалення і горіння газозавису часток зольного вугілля, що враховує можливість розплавлювання золи в процесі реагування. Встановлено, що тугоплавка зола відносно слабо впливає на характер реагування і час горіння газозавису частинок зольного вугілля в порівнянні з беззольним. Розплавлювання золи приводить не тільки до істотного збільшення часу повного реагування палива, але і до появи якісно нових залежностей часу горіння і середньої швидкості вигорання як функції концентрації окислювача і кількості зольних включень. Якісні зміни механізму реагування вугілля з легкоплавкою золою з'являються навіть при відносно невеликих значеннях зольності.

*Yarovoy T. A., Zolotko A. N., Vovchuk J. I., Poletaev N. I.*  
**Ignition, Combustion and Extinction of Ash-Rich Coal Particles.  
Part III. Combustion of Dusts of Ash-Rich Coal Particles**

**SUMMARY**

In a burning process ash is able to cover a surface of the coal particle and act as a diffusion barrier for oxygen (particularly liquid ash). A model is presented to describe spherical ash coal particles dust combustion in quiescent oxidizing gas and reveal the main factors of an ash influence on this process. Obtained results analysis demonstrates that a fusibility of the inorganic matter is one of the most significant ash coal characteristics. High-fusing ash has a weak influence on the conversion dynamics and burning time of an ash coal in the comparison with an ash free coal. The qualitative change of an ash coal combustion mechanism is able to appear if the temperatures reached in the combustion process exceed the ash fusing temperature. That, in its turn, leads not only to considerable increasing of the particles burning times but to appearance of the qualitatively new dependences of the burning time as a function of ash content and oxidizer mass fraction.