

15. Виленский Т.В., Хзмалян Д.М. Динамика горения пылевидного топлива: Исследования на электронных вычислительных машинах. — М.: Энергия, 1978. — 442 с.

117526, г. Москва,  
ИПМ РАН

Поступила в редакцию 15/II 1993,  
после доработки — 3/IX 1993

УДК 662.04:549.21

*В.П. Пацков, В.Б. Редькин, А.А. Анищенко,  
Г.Ф. Кузнецов*

## ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ВЫГОРАНИЯ КОКСОВЫХ ЧАСТИЦ В СУХОМ ВОЗДУХЕ

Предложены математическая модель, алгоритм и программа расчета процесса выгорания одиночных коксовых частиц в сухом воздухе. Выполнен численный анализ влияния параметров модели на выгорание и термический развал частиц.

При математическом моделировании процессов термохимической переработки (пиролиз, сжигание и газификация) энергетических твердых топлив в высокотемпературных дисперсных потоках [1, 2], в кипящем и фонтанирующем слое [3, 4] важное значение имеет корректное описание стадии выгорания коксового остатка топлива. Это необходимо для уточнения границ протекания реакции горения и газификации топливных частиц, выявления основных типов нестационарных и стационарных режимов, характерных для данного класса процессов, оценки эффективных времен выгорания и наблюдаемых скоростей превращения топлива [5, 6], теоретического объяснения явлений термического разрушения частиц и образования коксовой мелочи [7, 8], анализа условий воспламенения частиц [9].

Существующие в настоящее время методики расчета эффективных времен выгорания частиц коксовых остатков в низкотемпературном кипящем слое (КС) базируются [4] преимущественно на принципах стационарной диффузионно-кинетической теории горения и газификации твердого топлива, трактующей процесс горения кокса как диффузионный, слагающийся из реакции между углеродом и кислородом, углеродом и углекислотой, окисью углерода и кислородом [7, 10]. При этом рассматривается установившийся температурный режим, характеризующийся заданными температурными условиями. Особенности выгорания частиц на первоначальных стадиях взаимодействия коксовой частицы с окислителем, характеризующихся существенным изменением во времени основных характеристик процесса [5, 6] и влиянием конвективного переноса на его протекание, уделялось гораздо меньше внимания. Однако такие практически важные задачи управления процессами горения твердых топлив в кипящем слое, как пуск и остановка процесса, переходные режимы, управление температурой слоя, снижение степени механического недожога, прогнозирование вероятности термического разрушения и оптимизации времени пребывания частиц в слое как раз обуславливают повышенный интерес к закономерностям низкотемпературного горения частиц в нестационарных условиях.

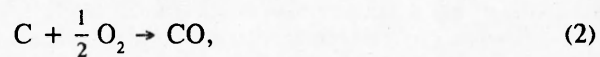
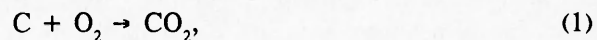
В работе [11] предложено математическое описание процесса горения — газификация одиночной коксовой частицы, окруженной горячей газовой оболочкой. Модель учитывает процессы молекулярной диффузии, теплопроводности и конвективного переноса, гомогенные химические превращения в газовой оболочке, поверхностные гетерогенные реакции взаимодействия коксового остатка с газами, изменение размеров частицы во времени. Частица предполагается сферической и беззольной, радиационный обмен осуществляется от изотермической поверхности, среда оптически прозрачна, коэффициент облученности равен 1, минимальный размер микротурбулентности

© В.П. Пацков, В.Б. Редькин, А.А. Анищенко, Г.Ф. Кузнецов, 1994.

при протекании процесса находится в пределах ста ее диаметров, газовая среда в пределах этого расстояния не турбулизована. Рассматривается случай газификации угольной пыли в потоке.

На основе метода прогонки с постоянным шагом по времени [12] авторами [11] разработан алгоритм расчета уравнений модели, но практически не проведен детальный численный анализ поведения частицы. Учитывая это обстоятельство, а также то, что модель [11] — одна из немногих попыток анализа процессов термохимических превращений частиц коксового остатка в нестационарных условиях, попытаемся распространить ее на случай выгорания мелкопористого твердого топлива типа коксовых остатков антрацитового штыба (АШ) или полуантрацита (ПА) в кипящем слое. Подобная постановка представляется правомерной в рамках А — S-модели горения частицы в кипящем слое. Она предполагает уменьшение радиуса частицы в процессе выгорания при ссыпании золы с внешней поверхности.

Рассмотрим также процесс взаимодействия одиночных частиц коксового остатка челябинского бурого угля с кислородом воздуха в условиях, соответствующих режимным параметрам работы предтопка с низкотемпературным кипящим слоем [13]:  $d_y^0 = 0 \div 7$  мм,  $T_r^0 = 785 \div 950$  С,  $C_{O_2}^0 = 5,0 \div 95$  %, предполагая, что для обоих рассматриваемых случаев влияние процессов выделения и сгорания летучих, а также внутривещного реагирования на выгорание коксовых остатков пренебрежимо мало. Примем, что на внешней поверхности частицы протекают следующие гетерогенные реакции:



а в окружающей частицу газовой оболочке — гомогенная реакция окисления окиси углерода



Поскольку реакции (1), (2) и (4) имеют сильно экзотермический характер, а скорость реакции окисления СО (3) при  $T = 785 \div 950$  °С обычно невысока, частица и газовая оболочка прогреваются вследствие тепловыделения при химических превращениях и теплопроводности. Кроме того, в газовой оболочке вокруг частицы протекают процессы молекулярной диффузии газовых компонентов и конвективного переноса вещества и энергии вследствие стефановских потоков, обусловленных реакцией с различным количеством молей. Влияние продольного обтекания частицы набегающим газовым потоком в пределах эффективного расстояния [11]

$$r^* = r_y^* \left( \frac{\rho_y^0}{f} \frac{T_r^0}{273} \right)^{1/3}$$

не рассматривается. Радиус частицы уменьшается, так как на поверхности частицы идут гетерогенные реакции горения и газификации коксового остатка.

Учитывая далее также основные допущения, принятые в [11], систему уравнений выгорания одиночной коксовой частицы можно представить в виде

$$r \leq r_y(t): \quad c_{py} \rho_y \frac{\partial T_y}{\partial t} = \lambda_y \left[ \frac{\partial^2 T_y}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T_y}{\partial r} \right], \quad (5)$$

$$r > r_y(t): \quad c_{pr} \rho_r \frac{\partial T_r}{\partial t} = \lambda_r \left[ \frac{\partial^2 T_r}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T_r}{\partial r} \right] - u_r \rho_r c_{pr} \frac{\partial T_r}{\partial r} + W_4 Q_4, \quad (6)$$

$$D_j^{(m)} \left[ \frac{\partial^2 \rho_j}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial \rho_j}{\partial r} \right] - u_r \frac{\partial \rho_j}{\partial r} \pm v_{4j} W_4 = \frac{\partial \rho_j}{\partial t}, \quad j = 1 - 4, \quad (7)$$

$$- \frac{\partial}{\partial r} [\rho_r u_r] = \frac{\partial \rho_r}{\partial t}, \quad p_r = RT_r \rho \sum_{j=1}^4 \frac{C_j}{M_j}, \quad (8)$$

$$\rho_r \frac{\partial u_r}{\partial t} + \rho_r u_r \frac{\partial u_r}{\partial r} = \frac{\mu_r}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r^2 \frac{\partial u_r}{\partial r} \right] - \frac{\partial p_r}{\partial r}, \quad (9)$$

$$\frac{\partial r_y}{\partial t} = - \frac{1}{\rho_y F_{yH}} \sum_{s=1}^3 v_{sc} w_s \quad (10)$$

со следующими начальными и краевыми условиями:

$$r = 0: \quad \frac{\partial T_y}{\partial r} = 0, \quad (11)$$

$$r = r_y(t): \quad D_j^{(m)} \frac{\partial \rho_j}{\partial r} - u_r \rho_j \pm v_{sj} W_s = 0, \quad (12)$$

$$\lambda_r \frac{\partial T_r}{\partial r} \Big|_{r \rightarrow r_y + 0} - \lambda_y \frac{\partial T_y}{\partial r} \Big|_{r \rightarrow r_y - 0} + \left[ \sum_{s=1}^3 W_s Q_s - c_{pr} \sum_{j=1}^4 D_j^{(m)} \frac{\partial \rho_j}{\partial r} - \varepsilon_c \sigma_0 \left[ \left( \frac{T_y}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_0}{100} \right)^4 \right] - u_r \rho_r c_{pr} T_r \right] \Big|_{r=r_y} = 0, \quad (13)$$

$$\rho_r = \frac{p_r}{RT_r \sum_{j=1}^4 \frac{C_j}{M_j}} \Big|_{r=r_y}, \quad u_r = \left[ \sum_{j=1}^4 D_j^{(m)} \frac{\partial \rho_j}{\partial r} + \sum_{s=1}^3 v_{sc} W_s \frac{r_y(t)}{3} \right] \frac{1}{\rho_y}, \quad (14)$$

$$r = r^*: \quad \rho_j = \rho_j^0, \quad T_r = T_r^0, \quad \frac{\partial u_r}{\partial r} = \hat{u}, \quad \rho_r = \rho_r^0, \quad j = 1 - 4, \quad (15)$$

$$t = 0: \quad \rho_j = \rho_j^0, \quad u_r = 0, \quad \rho_r = \frac{p_0}{RT_r \sum_{j=1}^4 \frac{C_j}{M_j}}. \quad (16)$$

Для численного решения системы (5) — (16) разработан итерационный алгоритм расчета, также базирующийся на методе прогонки [12], но содержащий в отличие от алгоритма [11] процедуру автоматического выбора шага по времени при помощи экстраполяции Ричардсона [12]. Последняя заключается в сопоставлении значений максимальных погрешностей вычисления температур газа в оболочке и частице на полном временном шаге и двух полушагах. Применение подобной вычислительной процедуры существенно уменьшило затраты машинного времени и позволило достичь времен выгорания, сопоставимых с наблюдаемыми в реальных опытных и опытно-промышленных аппаратах.

Программы для расчета процесса выгорания коксовой частицы реализованы на языках Фортран-IV для ЭВМ типа ЕС и Фортран-77 для ПЭВМ IBM PC AT-286/386. В программах также предусмотрен расчет радиальных и окружных термических напряжений, возникающих в частице при выгорании, по формулам теории упругости [8]:

$$\sigma_{t,r} = \frac{2\alpha_t E_t}{1-\nu_t} \left[ \frac{2}{(r_y^0)^3} \int_0^{r_y^0} T_y(r) r^2 dr - \frac{1}{r_y^0} \int_{r_y^0}^{r_y} T_y(r) r^2 dr \right], \quad (17)$$

$$\sigma_{t, \Theta} = \frac{\alpha_t E_t}{1 - \nu_t} \left[ \frac{2}{(r_y^0)^3} \int_0^{r_y^0} T_y(r) r^2 dr + \frac{1}{r_y^3} \int_{r_y^0}^{r_y} T_y(r) r^2 dr - T_y(r) \right]. \quad (18)$$

Макрокинетика поверхностных реакций горения и газификации коксового остатка рассчитывалась по общепринятым выражениям [10]:

$$W_s = \frac{\rho_j |_{r=r_y}}{1/k_s + 1/\beta_j}, \quad s = 1 - 3, \quad j = 1 - 3, \quad (19)$$

а гомогенной реакции окисления CO в газовой оболочке вокруг частицы — по выражению

$$W_4 = k_4 c_{CO} c_{O_2} \quad (20)$$

с кинетическими константами:  $k_4^0 = 3,09 \cdot 10^8 \text{ м}^3/(\text{кмоль} \cdot \text{с})$  и  $E_4 = 9,976 \cdot 10^7 \text{ Дж/кмоль}$ . Кинетические константы реакции горения и газификации коксовых остатков АШ выбирались на основании данных [15]:  $k_1^0 = k_2^0 = 12,2 \cdot 10^3 \text{ м/с}$ ,  $E_1 = E_2 = 122,0 \text{ кДж/моль}$ ,  $k_3^0 = 18,6 \cdot 10^5 \text{ л/с}$ ,  $E_3 = 229 \text{ кДж/моль}$ .

Для определения кинетических констант выгорания коксовых остатков челябинского бурого угля эксперимент проводился в безградиентном импульсном реакторе с кипящим слоем [16, 17]. При математической обработке результатов экспериментов с применением методов минимизации функции многих переменных [18, 19] и специально разработанной процедуры оценки коэффициентов корреляции и доверительных интервалов макрокинетических констант [17] на ПЭВМ IBM PC AT-286 получено:  $k_1^0 = k_2^0 = (4,4 \pm 0,3) \cdot 10^5 \text{ л/с}$ ,  $E_1 = E_2 = 104,4 \pm 4,1 \text{ кДж/моль}$ . Коэффициент корреляции между ними  $\rho_{12} \approx 0,07$  позволил добиться удовлетворительного согласования экспериментальных и расчетных значений наблюдаемых скоростей выгорания.

Кинетические константы реакции газификации коксовых остатков челябинского бурого угля выбирались такими же, как и для антрацитового штыба. Коэффициенты массообмена газов-реагентов с поверхностью коксовых частиц определялись по известным критериальным формулам [10]:

$$\text{Sh}_j = 2,0 + a \text{Re}_{12}^{0,5} \text{Sc}_j^{0,33}, \quad j = 1 - 3, \quad (21)$$

где  $\text{Sh}_j = \frac{\beta_j d_y}{D_j^{(M)}}$ ;  $\text{Re}_{12} = \frac{u_r \rho_r d_y}{\mu_r}$ ;  $\text{Sc}_j = \frac{\eta_r}{D_j^{(M)}}$ ;  $a = 0,3 \div 0,5$  — экспериментальная константа.

При численном анализе модели (5) — (20) на ЭВМ ЕС 1061 исследовалось влияние размеров частицы, температуры окружающего газа и концентрации окислителя на условия термического разрушения, воспламенения и выгорания одиночных частиц коксовых остатков антрацитового штыба и челябинского бурого угля в диапазоне параметров работы предтопка [13].

Динамика изменения основных характеристик выгорания одиночной коксовой частицы челябинского бурого угля с радиусом  $r_y^0 = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$  при начальной температуре окружающего газа 750 К приведена на рис. 1, а. Можно видеть, что характер изменения  $T_n$ , размеров частицы и степени конверсии согласуется с общепринятыми физико-химическими представлениями о закономерностях выгорания коксовых частиц [4, 7, 10, 15]. Поскольку начальная температура 750 К близка к точке воспламенения челябинского бурого угля [13], в начальной стадии выгорания имеет место рост  $T_n$ , а затем ее стабилизация. Размер частицы в ходе выгорания уменьшается, а степень конверсии (превращения) возрастает.

Кривая изменения скорости выгорания частицы

$$W_n = \sum_{s=1}^3 \nu_{Sc} W_s \quad (22)$$

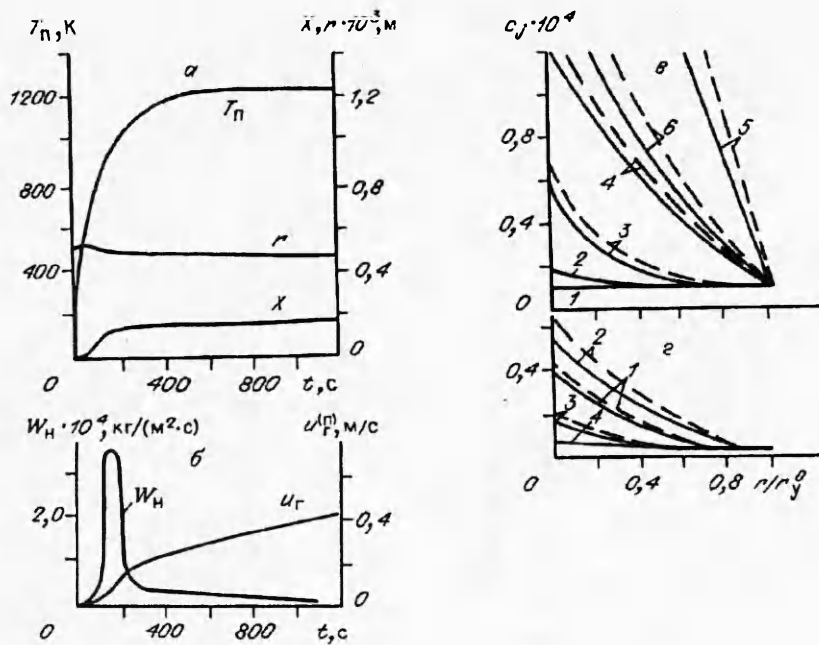
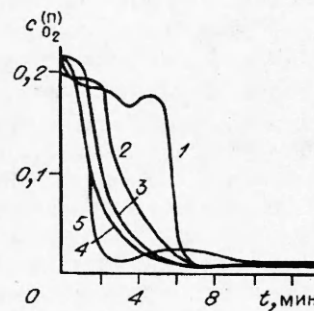


Рис. 1. Динамика изменения размеров частицы, степени конверсии и температуры поверхности коксовых частиц челябинского бурого угля (а), зависимости наблюдаемой скорости выгорания и скорости конвективного переноса газовых компонентов на внешней поверхности коксовых частиц угля (б) и профили концентрации продуктов горения в газовой оболочке в различные моменты времени (штриховые линии — CO, сплошные — CO<sub>2</sub>) (в, г).  
 а — t, с: 1 — 10,5, 2 — 61,5, 3 — 70,5, 4 — 79,5, 5 — 156,8; г — t, с: 1 — 95,6, 2 — 102,2, 3 — 118,3, 4 — 128,6.

во времени имеет более сложный, экстремальный характер. Рост  $W_n$  на начальной стадии выгорания связан с протеканием процесса во внешней, кинетической области реагирования и определяется интенсивным тепловыделением вследствие экзотермических реакций горения и активным расходом окислителя (рис. 1, а; 2; 3, а).

Внешнекинетическая область реагирования подтверждается близостью поверхностных концентраций кислорода в момент времени  $t_0 \leq t \leq t_{\max}$  (где  $t_{\max}$  — время, соответствующее максимуму наблюдаемой скорости выгорания) (рис. 2, а), а также результатами оценки химического критерия Нуссельта  $Nu_i = (k_1 + k_2) / \beta_{O_2}$ . При температуре 700 К  $Nu_i \approx 2,4 \cdot 10^{-5}$ , т.е. соответствует условно  $Nu_i \ll 1$  [20]. На начальной стадии выгорания скорости молекулярной диффузии газов и поверхности частицы высоки, а конвективный перенос продуктов реакции в газовую оболочку стефановским потоком практически отсутствует (рис. 1, б). Однако последующее интенсивное протекание гетерогенных реакций горения (1) и (2) способствует постепенному увеличению концентрации газообразных продуктов на поверхности частицы (рис. 3, б, в) и усилению скорости конвективного переноса газов в оболочку (см. рис. 1, б). В результате в оболочке накапливаются продукты реакции (рис. 1, в, г), доступ реагента-окислителя к поверхности частицы затрудняется и наблюдаемая скорость начинает уменьшаться с течением времени (см. рис. 1, а).

Рис. 2. Зависимость поверхностной концентрации кислорода  $c_{O_2}^{(n)}$  от t при выгорании коксовых остатков угля.  
 $r_y^0 \cdot 10^3$ , м: 1 — 3, 2 — 2, 3 — 1,5, 4 — 0,5, 5 — 0,315.



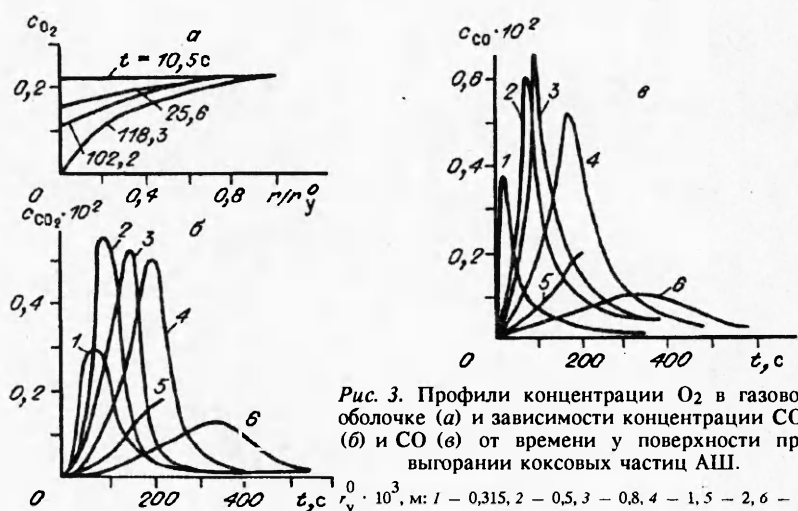


Рис. 3. Профили концентрации  $O_2$  в газовой оболочке (а) и зависимости концентрации  $CO_2$  (б) и  $CO$  (в) от времени у поверхности при выгорании коксовых частиц АШ.

$r_y^0 \cdot 10^3, \text{ м}$ : 1 — 0,315, 2 — 0,5, 3 — 0,8, 4 — 1,5 — 2, 6 — 3.

При выгорании коксовых частиц антрацитового штыба динамика изменения основных характеристик процесса была аналогична описанной выше. Для иллюстрации на рис. 1, в, г и 3, а представлены профили концентрации реагирующих веществ по радиусу оболочки для данного случая.

Анализ профилей температур в газовой оболочке и в частице для коксовых остатков обоих видов топлив показал, что в диапазоне режимных параметров, типичных для реальных опытно-промышленных установок с низкотемпературным кипящим слоем [13], частицы и оболочка остаются практически изотермическими. Лишь в начальной стадии процесса наблюдался разогрев внешней поверхности частиц относительно их центра, который снижался с течением времени. В стационарном режиме температуры газовой оболочки и частицы оставались практически равными, не превышающими температуры окружающего газа. В диапазоне варьировавшихся параметров не наблюдалось высокотемпературных стационарных режимов, характерных для процессов выгорания более крупных частиц [21].

Наиболее существенное влияние на изменение характеристик выгорания и термических напряжений коксовых частиц как антрацитового штыба, так и челябинского бурого угля оказывали их размеры.

Термограммы выгорания коксовых частиц АШ различных размеров, представленные на рис. 4, а, свидетельствуют о том, что более мелкие частицы прогреваются быстрее в соответствии с общепринятыми представлениями о физико-химических закономерностях выгорания коксовых остатков твердых топлив [4, 7, 10, 15, 20, 21]. Для челябинского бурого угля динамика выгорания частиц имела аналогичный характер. Следует отметить, что конечные точки оси абсцисс на термограмме рис. 4, а соответствуют эффективному времени выгорания частиц АШ до степени конверсии  $X = 0,95$  при заданных режимных условиях (при достижении указанной величины степени конверсии счет на ЭВМ прекращался).

При экспериментальном изучении процесса выгорания антрацитового штыба в низкотемпературном кипящем слое ( $\bar{a}_y = 1 \div 2 \text{ мм}$ ,  $A^d = 12,8 \div 31,8 \%$ ) при условиях, идентичных рассматриваемым в настоящей работе, найдены следующие оценки эффективных времен выгорания коксовых частиц до степени конверсии  $X = 0,9$ :  $t_{0,9}^* = 980 \div 3030 \text{ с}$  [15]. В частности, для частиц с зольностью  $A^d = 12,8 \%$  эти оценки находятся в пределах 98—1570 с и согласуются с величинами, полученными при расчетах по модели (1)—(22) (см. рис. 4, а). Следовательно, предлагаемая математическая модель позволяет получить оценки эффективных времен выгорания коксовых остатков твердых топлив, сопоставимые с экспериментально наблюдаемыми в опытных и опытно-промышленных технологических установках для аналогичных режимных условий.

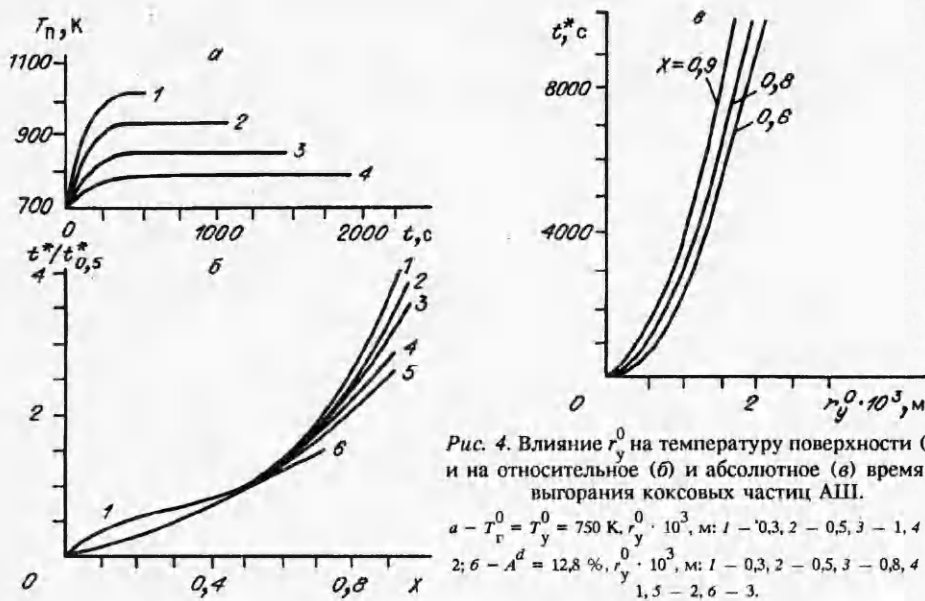


Рис. 4. Влияние  $r_y^0$  на температуру поверхности (а) и на относительное (б) и абсолютное (в) время выгорания коксовых частиц АШ.  
 а -  $T_{\Gamma}^0 = T_y^0 = 750 \text{ K}$ ,  $r_y^0 \cdot 10^3, \text{ м}$ : 1 - 0,3, 2 - 0,5, 3 - 1, 4 - 2; б -  $A^d = 12,8 \%$ ,  $r_y^0 \cdot 10^3, \text{ м}$ : 1 - 0,3, 2 - 0,5, 3 - 0,8, 4 - 1,5 - 2, 6 - 3.

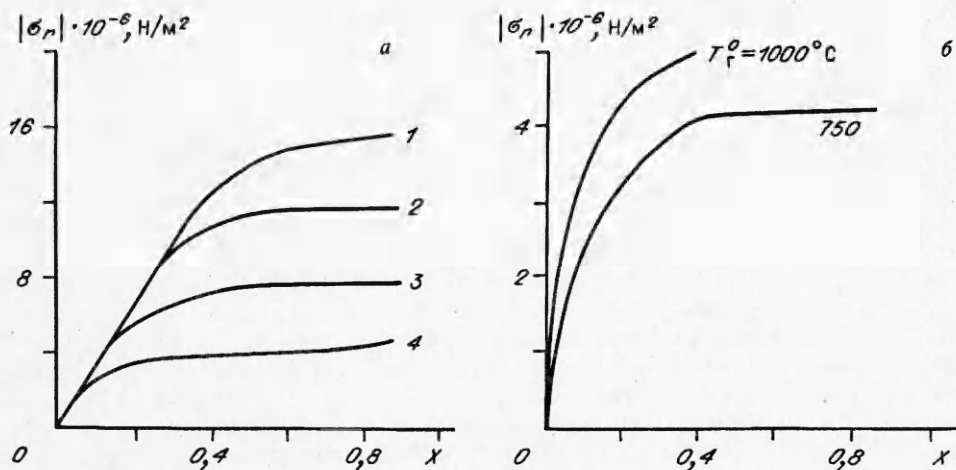


Рис. 5. Влияние степени конверсии топлива и размеров частиц (а), температуры окружающего газа (б) на изменение среднеинтегральных термических напряжений по радиусу коксовых частиц АШ.  
 а -  $r_y^0 \cdot 10^3, \text{ м}$ : 1 - 0,3, 2 - 0,5, 3 - 1, 4 - 2, 0;  $T_{\Gamma}^0 = T_y^0 = 750 \text{ K}$ ; б -  $r_y^0 = 0,25 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ .

На рис. 4, б показаны зависимости относительного эффективного времени выгорания коксовых частиц АШ ( $t^*$  — текущее время выгорания до заданной степени конверсии,  $t_{0,5}^*$  — время 50 %-й конверсии или полупревращения топлива) от степени конверсии при различных начальных размерах частиц. Видно, что до  $X = 50 \%$ , за исключением кривой для  $r_y^0 \approx 0,3 \text{ мм}$ , зависимость единая, а затем кривые расходятся, свидетельствуя о тенденции снижения относительного эффективного времени выгорания при увеличении размеров частицы. Слияние кривых в единую при  $X \leq 50 \%$  связано с протеканием процесса во внешнекинетической области реагирования, а их расхождение при  $X > 50 \%$  — с появлением внешнедиффузионных торможений и усилением конвективного переноса продуктов химических превращений от поверхности частицы.

Вывод о появлении диффузионных торможений подтверждается также результатами оценки химического критерия Нуссельта для реакции горения

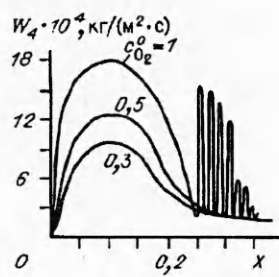


Рис. 6. Зависимость  $W_4(X)$ .

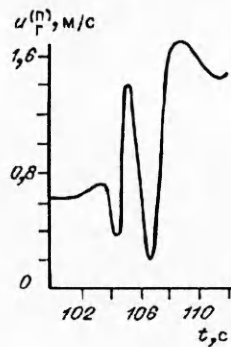


Рис. 7. Зависимость поверхностной скорости конвективного переноса газовых продуктов от времени при горении коксовых частиц челябинского бурого угля в чистом кислороде.

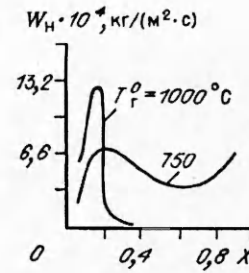


Рис. 8. Влияние температуры окружающего газа на наблюдаемую скорость выгорания коксовых частиц АШ;  $r_y^0 = 0,25 \cdot 10^{-3}$  м.

при  $T_r = 1300$  К ( $Nu \approx 0,335 \div 0,37$ ), а также данными рис. 4, в, где  $t^* \sim (r_y^0)^2$ . Это согласуется с общепринятыми представлениями о физико-химических закономерностях процессов горения твердых топлив [22]. Хотя здесь необходимо отметить, что в данном случае речь идет не о глубокой диффузионной области, для которой химические критерии Нуссельта  $Nu_j \gg 1$ , а о переходном режиме реагирования, имеющем место между двумя предельными случаями: внешнекинетическим и внешнедиффузионным. Динамика выгорания коксовых частиц челябинского бурого угля в зависимости от степени конверсии и размеров была аналогичной.

Зависимость абсолютной величины радиальных термических напряжений внутри коксовых частиц АШ от степени конверсии, размеров и температуры окружающего газа приведена на рис. 5. Видно, что в ходе выгорания с ростом размеров и понижением температуры газа  $|\sigma_r|$  уменьшается, поэтому реальные значения (с отрицательным знаком) увеличиваются. Для коксовых остатков челябинского бурого угля ситуация аналогична. В обоих рассматриваемых случаях значения окружных термических напряжений были близки к радиальным. Следовательно, в диапазоне режимных параметров опытно-промышленных аппаратов с низкотемпературным кипящим слоем [13] термический развал коксовых частиц наиболее вероятен либо на крупных частицах, внутри которых могут развиваться существенные температурные градиенты, либо на мелких частицах, близких к точке воспламенения ( $T_r = 750$  К, соответствующая кривой 2 на рис. 5, б, близка к температуре воспламенения частиц коксовых остатков антрацитового штыба диаметром 0,5 мм [15]).

Снижение наблюдаемой скорости выгорания коксовых остатков (рис. 6) в переходном режиме реагирования отмечалось и при вариации концентрации кислорода в объеме окружающего газа. Причем при увеличении концентрации максимум  $W_n$  возрастал и смещался в сторону меньших  $X$ , что свидетельствовало о более быстром переходе процесса в диффузионную область реагирования в области высоких концентраций окислителя. Кроме того, при выгорании в чистом кислороде отмечены колебания скорости реакции при  $X = 0,21 \div 0,32$ , связанные с аналогичным характером изменения поверхностных скоростей конвективного переноса газовых продуктов (рис. 7). При анализе процесса в области более низких концентраций  $O_2$  подобных явлений не наблюдалось. Здесь скорость конвективного отвода газообразных компонентов от поверхности частицы при росте ее размеров монотонно увеличивалась.

Влияние температуры окружающего газа на динамику изменения  $W_n$  антрацитового штыба аналогично влиянию концентрации кислорода (рис. 8).



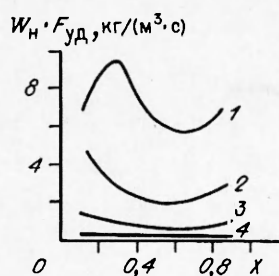


Рис. 9. Влияние размеров частиц на скорость выгорания коксовых частиц АШ ( $T_{\Gamma}^0 = T_{\Gamma}^1 = 750$  К).  
 $r_{\Gamma}^0 \cdot 10^3$ , м: 1 — 0,3, 2 — 0,5, 3 — 1,0, 4 — 2,0.

Появление второго экстремума на кривых выгорания при 750 К обусловлено воспламенением частиц АШ диаметром 0,5 мм при указанной температуре.

С ростом размеров частиц коксовых остатков антрацитового штыба картина их выгорания существенно изменялась:  $W_n$  уменьшалась с постепенным переходом от экстремального характера кривых при мелких размерах к практическому постоянству данной характеристики от степени конверсии для частиц крупных размеров (рис. 9). Воспламенение частиц, наоборот, усиливалось при уменьшении размеров.

Итак, предложенная в настоящей работе математическая модель позволяет получать результаты, не противоречащие общепринятым представлениям о физико-химических закономерностях процессов выгорания коксовых остатков твердых топлив, и может быть использована при соответствующем уточнении параметров для решения практических инженерных задач по прогнозированию условий воспламенения, термического разрушения коксовых частиц. В частности, для получения более точных данных об условиях термического разрушения частиц необходима информация о предельных термических напряжениях для данного конкретного вида топлива, которая, к сожалению, в литературе пока весьма ограничена.

Достаточно важным выводом по результатам проведенных расчетов представляется подтверждение правомерности допущения об изотермичности частиц твердого топлива в условиях, близких к режимным параметрам работы реальных опытно-промышленных аппаратов с низкотемпературным кипящим слоем. Представляет также интерес отмеченный при расчетах факт резкого снижения интенсивности выгорания коксовых частиц в переходном режиме реагирования, обусловленный влиянием диффузионных торможений и конвективного переноса.

Указанные эффекты дают возможность объяснить сложный экстремальный характер экспериментальных зависимостей наблюдаемых скоростей выгорания мелкопористых низкорекционных топлив типа АШ или ПА, полученный в ряде работ [6, 15, 18]. Известные в настоящее время методики расчета эффективных характеристик выгорания коксовых остатков твердых топлив в кипящем слое, основанные на допущениях о стационарных условиях протекания процесса [1—4], этого сделать не позволяют. Подобное обстоятельство может приводить к существенному искажению информации о наблюдаемых скоростях и эффективных временах выгорания частиц, а также о коэффициентах тепло- и массообмена между частицами и газовым потоком. Поэтому существующие методики оценки наблюдаемых скоростей выгорания коксовых частиц в кипящем слое нуждаются в уточнении и развитии.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Евстафьев В.А., Вандышева О.А. // Топливоиспользование и охрана окружающей среды: Сб. научн. тр. — М.: МЭИ, 1985. — № 6. — С. 65—76.
2. Пацков В.П., Чернявский Н.В., Веденев А.Н. и др. // Проблемы энергосбережения, 1990. — Вып. 3. — С. 42—50.
3. Волков Э.П., Егай М.Н., Шакарян Р.Ю. // ИФЖ. — 1987. — 52, № 6. — С. 956—964.
4. Махорин К.Е., Хинкис П.А. Сжигание топлива в псевдоожигенном слое. — Киев: Наук. думка, 1989. — 204 с.
5. Корчевой Ю.П., Редькин В.В., Майстренко А.Ю. и др. // Проблемы газификации углей: Докл. Всесоюз. симп. — Красноярск, 1991. — С. 159—168.
6. Корчевой Ю.П., Пацков В.П., Редькин В.В. и др. // Там же. — С. 150—159.

7. Головина Е.С. Высокотемпературное горение и газификация углерода. — М.: Энергоатомиздат, 1983. — 176 с.
8. Шестаков С.М., Любов В.К., Павлов А.М. и др. // Горение органического топлива. — Новосибирск: Ин-т теплофизики СО РАН, 1984. — Ч. II. — С. 225—234.
9. Асланян Г.С., Директор Л.Б. // Проблемы газификации углей: Докл. Всесоюз. симп. — Красноярск, 1991. — С. 66—73.
10. Laurendeau N. // Progress in energy and combustion science. — L., United Kingdom: Pergamon Press, 1978. — V. 4. — P. 221—270.
11. Степанов С.Г., Исламов С.Р., Баскаков А.П. // Проблемы тепло- и массопереноса в тепло-энергетических установках с дисперсными потоками. — Минск: ИТМО, 1985. — С. 25—30.
12. Самарский А.А. Теория разностных схем. — М.: Наука, 1977. — 656 с.
13. Кузнецов Г.Ф., Торопов Е.Ф., Сулейменов К.А. и др. // Проблемы газификации углей: Докл. Всесоюз. симп. — Красноярск, 1991. — С. 73—76.
14. Weirner A.W., Glough D.E. // Chem. Eng. Sci. — 1981. — 36, N 2. — P. 180—201.
15. Майстренко А.Ю. Горение и газификация высокозольных углей в кипящем слое: Дис. техн. наук. — М.: ЭНИН им. Г.М. Кржижановского, 1990. — 270 с.
16. Пацков В.П., Финин Г.С., Майстренко А.Ю. // Химия твердого топлива. — 1990. — № 3. — С. 134—142.
17. Пацков В.П., Редькин В.Б., Анищенко А.А. и др. // Там же. — 1992. — № 2. — С. 101—108.
18. Анищенко А.А., Гленко И.Л. // Проблемы энергосбережения. — 1990. — Вып. 4. — С. 55—57.
19. Пацков В.П., Финин Г.С., Бродацкая И.В. и др. // Сиб. физ.-техн. журн. — 1991. — Вып. 5. — С. 65—71.
20. Основы практической теории горения: Учеб. пособие для вузов // В.В. Померанцев, К.М. Арефьев, Д.Б. Ахмедов и др. / Под ред. В.В. Померанцева. — Л.: Энергоатомиздат, 1986. — 312 с.
21. Sotirhos C.V., Amundson N.-R. // Ind. Eng. Chem. Fundam. — 1984. — 23, N 2. — P. 180—201.
22. Франк-Каменецкий Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. — М.: Наука, 1987. — 502 с.

252070, г. Киев,  
Институт проблем энергосбережения  
АН Украины

Поступила в редакцию — 26/VI 1992,  
после доработки — 13/VIII 1993

УДК 614.841.12

*Ю.Н. Шебеко, С.Г. Цариченко, А.Я. Корольченко,  
А.Ю. Каплин, Г.А. Попков*

## РАСЧЕТ ПРЕДЕЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ДИФFUЗИОННОГО ГОРЕНИЯ ВОДОРОДСОДЕРЖАЩИХ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ

Предложен новый метод расчета предельных условий диффузионного горения водородсодержащих газовых смесей, позволяющий для заданных значений скорости истечения и диаметра горелки определять содержание инертного разбавителя на пределе горения. Проведено сравнение результатов расчетов с имеющимися экспериментальными данными.

Для обеспечения пожаро- и взрывобезопасности технологических процессов, в которых используются водородсодержащие газовые смеси, представляет интерес знание предельных условий стабилизации диффузионного факела (предельные состав смесей и скорость их истечения). Экспериментальное определение указанных параметров достаточно трудоемко, в связи с чем представляется актуальным создание соответствующих расчетных методов, разработке которых посвящены работы [1—6].

В [1] найдено, что предельные концентрации горючего в смеси с разбавителем или окислителем в смеси с флегматизатором существенно зависят от скорости относительного движения горючего газа и окислительной среды. При этом наиболее благоприятные условия существования диффузионного пламени (максимальная предельная концентрация разбавителя) реализуются при относительно малых скоростях потока, когда срыв пламени

© Ю.Н. Шебеко, С.Г. Цариченко, А.Я. Корольченко, А.Ю. Каплин, Г.А. Попков, 1994.