

Рис. 1. Режимы горения кругового цилиндра.

а) спиновый (может быть изучен также с помощью стационарного подхода путем введения «винтовых» координат (см. [2]); б) симметричный; в) предельный.

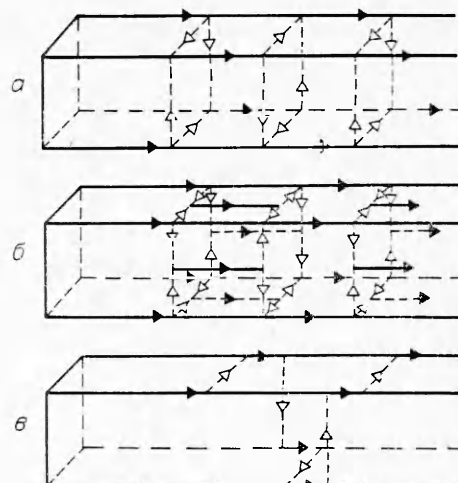


Рис. 2. Режимы горения образцов с квадратным сечением.

а, б) соответствуют простому собственному значению; в) двукратному.

ческая волна существует при $\mu < \mu_0$ (докритический режим), а если $\mu_2 > 0$, то при $\mu > \mu_0$ (надкритический режим).

В цитированных работах [2—5] проведено также исследование устойчивости. В частности, показано, что докритические режимы неустойчивы, надкритические режимы устойчивы в случае простого собственного значения ($n = 1$). В случае кратного собственного значения ($n > 1$) надкритические режимы могут быть как устойчивыми, так и неустойчивыми.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дж. Марден, М. Мак-Кракен. Бифуркация рождения цикла и ее приложения. М.: Мир, 1980.
2. В. А. Вольперт, А. И. Вольперт, А. Г. Мержанов. Докл. АН СССР, 1982, 262, 3.
3. В. А. Вольперт, А. И. Вольперт, А. Г. Мержанов. Докл. АН СССР, 1982, 263, 4.
4. А. И. Вольперт, В. А. Вольперт. Бифуркации волн, описываемых параболическими системами. Препринт ОИХФ АН СССР. Черноголовка, 1982.
5. В. А. Вольперт. Бифуркации нестационарных режимов распространения волн. Препринт ОИХФ АН СССР. Черноголовка, 1982.
6. B. J. Matkowsky, G. I. Sivashinsky. SIAM J. Appl. Math., 1978, 35, 3.

УДК 662.612 : 66.096.5

РАСЧЕТ ГОРЕНИЯ ОДИНОЧНЫХ ЧАСТИЦ В КИПАЮЩЕМ СЛОЕ

М. Р. Курмангалиев, К. А. Сулейменов, Д. А. Бименов

(Алма-Ата)

Применение топок с кипящим слоем позволит уменьшить габариты котельного агрегата, снизить капитальные и эксплуатационные затраты, решить проблему защиты окружающей среды от выбросов SO_2 и NO_x , использовать низкосортные топлива. Одной из важнейших проблем, возникших при создании низкотемпературных топок с кипящим слоем, является снижение механического недожога. Для решения этого вопроса необходимо знать закономерности процесса горения коксового остатка угольных частиц.

В работах [1—3] даются противоречивые данные о макрохимизме и режиме горения углеродных частиц. Поэтому в КазНИИЭнергетике проведены расчеты горения одиночной коксовой частицы в кипящем

слое. При расчетах использованы допущения, характерные для горения одиночных частиц [4]. Кроме того, принято, что частица омывается газовым потоком со скоростью минимального псевдооживления. Горение одиночной частицы описывается [4]:

— уравнением горения одиночной частицы

$$\frac{d\delta}{d\tau} = \frac{1}{M\beta} \frac{D\gamma'C}{\delta} \operatorname{Sh} \frac{1}{1 + \operatorname{Sh} \frac{D}{K\delta}}, \quad (1)$$

— уравнением теплообмена между частицей и окружающей средой

$$VC_T\gamma' \frac{d(T' - T)}{d\tau} = -QS' \frac{\gamma'}{2} \frac{d\delta}{d\tau} - \alpha'S'(T' - T) - S'\sigma[(T')^4 - (T)^4]. \quad (2)$$

В расчетах принято, что при $T' < 1073$ К горение углерода происходит практически до CO_2 ($\beta = 1,0$), а при $T' > 1473$ К — до CO ($\beta = 0,5$). Для определения β в пределах $1073 < T' < 1473$ использовались экспериментальные зависимости z_1 и z_2 от температуры [6]. Стехиометрический коэффициент можно представить в виде

$$\beta = 2 \frac{z_1}{z_2} + 1 \left/ 2 \left(\frac{z_1}{z_2} + 1 \right) \right., \quad (3)$$

где z_1 и z_2 — количество углерода, прореагировавшего до CO_2 и CO соответственно. При этом теплота сгорания кокса изменяется по зависимости

$$Q = 4520(1 - \beta) + 7850(2\beta - 1). \quad (4)$$

Для определения критерия Нуссельта использована зависимость Сокольского и Тимофеевой [4]

$$\text{Nu} = 2 + 0,16\text{Re}^{2/3}. \quad (5)$$

Число Шервуда определяли по уравнению [5]

$$\text{Sh} = 2\varepsilon + 0,69 \text{Re}^{1/2} \left(\frac{\nu}{D} \right)^{1/3}. \quad (6)$$

Решение системы уравнений выполнялось методом Рунге — Кутты. Были определены температуры частицы T' , время выгорания τ , стехиометрический коэффициент β и режимный критерий R_R . Варьировались следующие величины: температура слоя T , концентрация кислорода в слое C_{O_2} , энергия активации E , скорость псевдооживления u , удельный вес кокса γ' .

Здесь приведены результаты расчета для одиночной коксовой частицы начальным размером $\delta_0 = 5$ мм, $\gamma' = 1850$ кг/м³, $u = 0,4$ м/с.

На рис. 1 представлена зависимость изменения температуры частицы в процессе ее выгорания при различном содержании кислорода в окружающем газе при температуре слоя 1173 К, $E = 30$ ккал/моль. По мере выгорания частицы ее температура во всех случаях падает. Это можно объяснить улучшением теплообмена частицы с газом при уменьшении ее размера. Содержание кислорода в газах оказывает сильное влияние на температуру частицы. Так, при содержании O_2 5% температура частицы диаметром 3 мм составляет 1270 К, т. е. разность температур равна 100°. При содержании O_2 в газах 10 и 15% превышение температуры частицы диаметром 3 мм над температурой слоя составляет соответственно 230 и 400°. В случае постоянной концентрации O_2 в газах увеличение температуры приводит к росту температуры частицы, но разность температур остается примерно одинаковой.

На рис. 2 показано время выгорания частиц с $\delta_0 = 5$ мм при различных T , C_{O_2} и E . Температура слоя существенно влияет на время выгорания. Так, при $T = 1123$ К частица с размером до 1 мм выгорает за 1100 с, при 1173 — за 840, а при $T = 1223$ — за 760. Содержание кислорода в газах также оказывает сильное влияние на время выгорания.

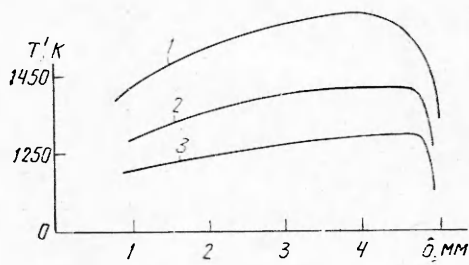


Рис. 1. Зависимость температуры горячей частицы от диаметра ($E = 30$ ккал/моль; $T = 1173$ К) при различных C_{O_2} , %:

1 — 15; 2 — 10; 3 — 5.

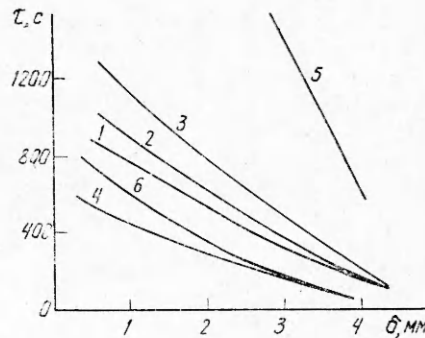


Рис. 2. Время выгорания углеродных частиц (при разных E (ккал/моль), T (К), C_{O_2} (%)).

1 — $T = 1223$, $E = 30$, $C_{O_2} = 10$; 2 — $T = 1173$, $E = 30$, $C_{O_2} = 10$; 3 — $T = 1023$, $E = 30$, $C_{O_2} = 10$; 4 — $T = 1173$, $E = 30$, $C_{O_2} = 15$; 5 — $T = 1173$, $E = 30$, $C_{O_2} = 5$; 6 — $T = 1173$, $E = 20$, $C_{O_2} = 10$.

Например, при $C_{O_2} = 15\%$ частица выгорает до размера 3 мм за 165 с, при 10 — за 460 и при 5 — за 1400. Это связано с разностью температур слоя и частицы. При постоянных C_{O_2} , T и уменьшении энергии активации время сгорания частицы уменьшается. При $E = 20$ ккал/моль и $C_{O_2} = 10\%$ частица выгорает до размера 0,5 мм за 720 с, тогда как при $E = 30$ τ составляет 1010 с. Объясняется это изменением режима горения. При $E = 20$ ккал/моль горение протекает в чисто диффузионной области, и дальнейшее уменьшение энергии активации не приводит к существенным изменениям параметров горения. Поэтому на рисунках приведены только данные при $E = 30$ и 20 ккал/моль.

На рис. 3 дано изменение режимного критерия частицы по мере ее выгорания при различных T , C_{O_2} и E . Вначале идет прогрев частицы, и процесс горения переходит из кинетической области в диффузионную. Затем по мере выгорания наблюдается уменьшение R_k , т. е. переход горения в промежуточную область. Изменение температуры слоя от 1123 до 1223 К не оказывает сильного влияния на режим горения частицы. R_k изменяется от 0,75 до 0,85. Уменьшение температуры слоя до 1023 К приводит к значительному падению температуры частицы, в результате чего скорость горения резко падает, и горение частицы переходит в кинетическую область. Как видно из рис. 3, увеличение содержания O_2 в газах приводит к тому, что горение переходит из промежуточной области

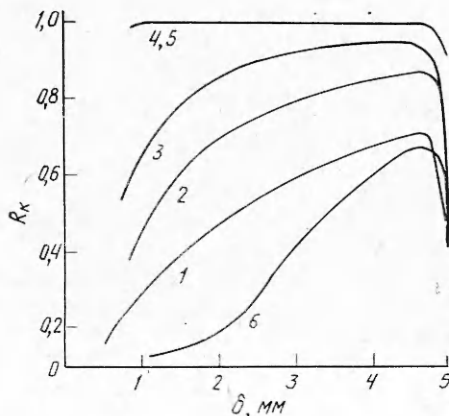


Рис. 3. Зависимость режимного критерия R_k от содержания кислорода (E , ккал/моль, T , К), %:

1 — $C_{O_2} = 50$; 2 — $C_{O_2} = 10$; 3 — $C_{O_2} = 15$, $E = 30$, $T = 1173$; 4 — $C_{O_2} = 10$, $E = 20$; 5 — $C_{O_2} = 10$, $E = 15$; 6 — $C_{O_2} = 10$, $E = 30$, $T = 1023$.

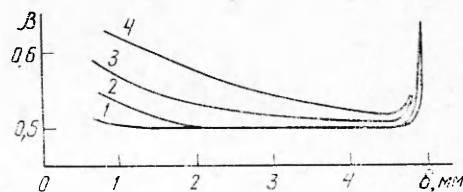


Рис. 4. Зависимость стехиометрического коэффициента ($C_{O_2} = 10\%$) от температуры слоя (T , К):

1 — 1223; 2 — 1173; 3 — 1123; 4 — 1043.

в диффузионную. Так, для частицы $\delta = 3$ мм при $C_{O_2} = 5\%$ $R_k = 0,6$, а при $C_{O_2} = 15$, $R_k = 0,92$. Это объясняется тем, что увеличение C_{O_2} приводит к росту температуры частицы, в результате чего значительно растет химическая скорость горения и скорость горения определяется подводом окислителя к поверхности горячей частицы. Уменьшение энергии активации с 30 до 15 и 20 ккал/моль при $C_{O_2} = 10\%$ приводит к чисто диффузионному горению, что также объясняется увеличением скорости химической реакции.

На рис. 4 представлено изменение стехиометрического коэффициента β по мере выгорания частицы при различных температурах слоя. Из рисунка видно, что уменьшение температуры слоя приводит к частичному горению кокса до CO_2 на поверхности частицы. Но доля горения до CO_2 сильно зависит от размера частицы. Так, для частиц размером 4 мм уменьшение температуры слоя с 1223 до 1073 К увеличивает β с 0,5 до 0,53, а для частицы размером 1 мм — соответственно с 0,5 до 0,64. Увеличение β с уменьшением размера частицы объясняется понижением температуры частицы в связи с увеличением коэффициента теплообмена. Расчеты показывают, что уменьшение содержания O_2 в газах приводит к увеличению β , что объясняется относительно низкой температурой горячей частицы.

Таким образом, как показали расчеты, режим и макрохимизм горения зависят от энергии активации реакции, температуры слоя и содержания кислорода. Этим объясняются противоречивые выводы, имеющиеся в литературе.

ЛИТЕРАТУРА

1. M. M. Avedesian, J. F. Davidson. Trans. Inst. Chem. Eng., 1973, 51, 124.
2. Probir Basu. Fuel, 1977, 56, 4, 320.
3. R. K. Chakraborty, I. R. Howard. J. Inst. of Fuel, 1978, 409, 51, 220.
4. А. Б. Резняков, И. П. Басина, С. В. Бухман и др. Горение натурального твердого топлива. Алма-Ата: Наука, 1968.
5. P. N. Rowe, K. T. Claxton, J. V. Lewis. Trans. Inst. Chem. Eng., 1963, 43, T14 — T31.
6. С. В. Бухман, Е. Нурекенов. Проблемы теплоэнергетики и прикладной теплофизики. Вып. 2. Алма-Ата: Наука, 1965.

УДК 536.46 : 533.6

ОСОБЕННОСТИ СВЕРХЗВУКОВОГО ГОРЕНИЯ НЕПЕРЕМЕШАНЫХ ГАЗОВ В КАНАЛАХ

В. Л. Зимонт, В. М. Левин, Е. А. Мещеряков, В. А. Сабельников
(Москва)

Сверхзвуковое горение перемешанных газов в каналах определяется взаимодействием турбулентного обмена, химической кинетики и газодинамических эффектов, сопровождающих тепловыделение. При определенных условиях влияние каждого из перечисленных факторов может стать критическим для процесса горения. В настоящей работе приводятся экспериментальные и расчетные результаты, имеющие целью прояснить роль этих факторов в формировании физической картины течения. Основное внимание уделено анализу влияния на горение торможения сверхзвукового потока до дозвуковых скоростей, пульсаций концентрации и конечных скоростей химических реакций.

1. При горении в сверхзвуковых потоках в каналах возможны два режима, которые являются аналогами недосжатой (продукты сгорания имеют сверхзвуковую скорость, $M > 1$) и пересжатой ($M < 1$) детонационных волн [1]. В отличие от собственно детонации торможение в каналах происходит в псевдоскачке на длине порядка 10 калибров [2, 3].