

## ЛИТЕРАТУРА

1. А. с. 852027 СССР, G 05 В 5/00. Способ термического обезвреживания сточных вод. Цыпкин А.Г. Справочник по математике / Под ред. С.А. Степанова. – 3-е изд. – М.: Наука, 1983. – 480 с.

УДК 621.18

Г.И. ЖИХАР

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГОРЕНИЯ ЖИДКОГО ТОПЛИВА В КИНЕТИЧЕСКО-ДИФфуЗИОННОЙ ОБЛАСТИ

Математическая модель должна учитывать основные факторы, влияющие на процесс горения жидкого топлива как в кинетической, так и в диффузионной области.

Математическая модель включает следующие уравнения.

1. Уравнение движения газовой среды для закрученной струи. В соответствии с [1] это уравнение в цилиндрических координатах запишется в следующем виде:

$$W_z = \frac{2\alpha^2}{(1+\alpha^2\eta^2/4)^2} \frac{1}{\bar{X}} - \frac{1}{2} \beta \alpha^2 \frac{(1-3\alpha^2\eta^2/4)}{(1+\alpha^2\eta^2/4)^3} \frac{1}{\bar{X}^2};$$

$$W_r = \sqrt{\epsilon} \left( \frac{\alpha^2\eta(1-\alpha^2\eta^2/4)}{(1+\alpha^2\eta^2/4)^2} \frac{1}{\bar{X}} - \frac{1}{2} \beta \alpha^2 \frac{\eta(1-3\alpha^2\eta^2/4)}{(1+\alpha^2\eta^2/4)} \frac{1}{\bar{X}^2} \right);$$

$$W_\varphi = \gamma \frac{\alpha\eta}{(1+\alpha^2\eta^2/4)} \frac{1}{\bar{X}^2},$$

где  $\bar{X}$  – относительная длина струи:  $\bar{X} = X/d$ .

Коэффициент турбулентной вязкости  $\epsilon = a \sqrt{\frac{3K_0}{16\pi\rho}}$ . Остальные величины,

входящие в уравнения движения газовой среды, определяются по следующим формулам:

$$\alpha = \frac{1}{\sqrt{a}} \sqrt[4]{\frac{3K_0}{16\pi\rho}}; \quad \eta = \frac{1}{a} \frac{r}{\bar{X}\alpha};$$

$$\gamma = \frac{1}{4a^2} \sqrt{\frac{3}{\pi}} \frac{L_0}{\sqrt{\rho K_0}}; \quad \beta = \frac{Q_0}{2\pi\epsilon\rho}.$$

2. Уравнение движения горячей капли. В цилиндрических координатах это уравнение запишется в следующем виде [2]:

$$\frac{dv_r}{d\tau} = \frac{v_\varphi^2}{r} + \frac{3\gamma}{4\gamma_\kappa \delta} \zeta (W_r - v_r) \sqrt{(W_\varphi - v_\varphi)^2 + (W_z - v_z)^2 + (W_r - v_r)^2};$$

$$\frac{dv_\varphi}{d\tau} = -\frac{v_\varphi v_r}{r} + \frac{3}{4} \frac{\gamma}{\gamma_\kappa} \zeta (W_\varphi - v_\varphi) \sqrt{(W_\varphi - v_\varphi)^2 + (W_z - v_z)^2 + (W_r - v_r)^2};$$

$$\frac{dv_z}{d\tau} = \frac{3\gamma}{4\gamma_\kappa \delta} \zeta (W_z - v_z) \sqrt{(W_\varphi - v_\varphi)^2 + (W_z - v_z)^2 + (W_r - v_r)^2}.$$

3. Уравнение выгорания капли топлива. Уравнение выгорания капли жидкого топлива с учетом замедленного горения кокса запишется в виде, приведенном в [2]:

$$-\frac{d\delta_0^2}{d\tau} = \frac{8\lambda}{(1,75 - 0,65\delta_0^2) \gamma_\kappa c_\pi (1 - r_\kappa/r_\Gamma)} \ln(1 + c_\pi (T_\Gamma - T_\kappa)/g_{исп}).$$

4. Уравнение выгорания полидисперсной системы. Для текущей массы капель, приходящейся на 1 кг исходного топлива, можно записать [3]:

$$G = mn \int_{(1-x^2)^{1/2}}^1 \frac{e^{-my^n}}{y^{4-m}} (y^2 - (1-x^2))^{3/2} dy,$$

где  $x$  — текущий относительный диаметр наиболее крупной капли:  $x = \delta_1/\delta_{01}$ ;  $y$  — отношение начального размера капли промежуточной фракции к начальному размеру наиболее крупной капли:  $y = \delta_{0i}/\delta_{01}$ ;  $m, n$  — параметры, характеризующие полидисперсность системы. Если принять  $m = 4,6$ , т. е. считать, что относительная масса капель с начальным диаметром  $\delta_{01}$  составляет 1%, а  $n = 2,5$  для центробежных форсунок, то приближенно получим

$$G = 2 \cdot 10^{-4} e^{8,5x^2}.$$

Доля испарившегося топлива равна  $R = 1 - G$ .

5. Уравнение смешения топлива с воздухом. Если топливо впрыскивается центробежными форсунками, топливный факел можно представить в виде совокупности точечных источников, равномерно распределенных по периферии кольца радиусом  $R_0$  [4].

В этом случае уравнение смешения топлива с воздухом запишется в следующем виде:

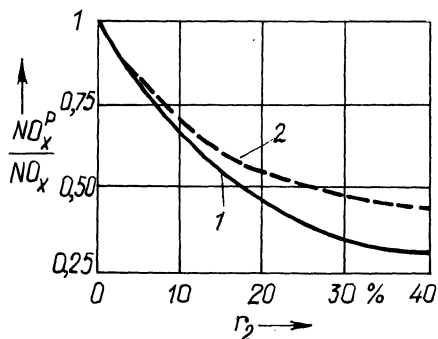
$$f = \frac{G_\tau R_\kappa^2 K}{G_B R_0^2} I_0(2Kr/R_0) e^{-K(1+r^2/R_0^2)},$$

где  $f$  — местное отношение топлива к воздуху;  $K$  — численный комплекс:  $K = WR_0^2/(4D_\tau - X)$ ;  $I_0$  — функция Бесселя нулевого порядка.

6. Уравнение теплового баланса реагирующей среды. Теплообмен с окру-

Рис. 1. Влияние искусственной рециркуляции газов на снижение выхода оксидов азота при двухступенчатом сжигании жидкого топлива:

1 — кинетическая область горения; 2 — кинетическо-диффузионная область горения



жающей средой моделировался взаимодействием реагирующей среды с облучателем, температура которого принималась равной температуре газов после окончания горения.

Уравнение теплового баланса реагирующей среды запишется следующим выражением [5]:

$$c_v \rho \frac{dl}{d\tau} = \sum g_i W_i - \alpha \frac{S}{V} (T - T_0),$$

где  $c_v$  — теплоемкость продуктов сгорания;  $\rho$  — плотность;  $g_i$ ,  $W_i$  — тепловые эффекты и скорости отдельных стадий;  $\alpha$  — коэффициент теплоотдачи;  $T$  — средняя температура газовой смеси;  $T_0$  — температура газов после окончания горения.

7. Уравнение изменения содержания реагирующих реагентов. Изменение содержания реагирующих реагентов во времени в общем виде описывается кинетическим дифференциальным уравнением вида

$$dC_i/d\tau = \sum_{j,k,l \neq i} K_{jkl} C_j C_k C_l - \sum_{m,n,p} K_{mnp} C_m C_n C_p,$$

где  $K_{jkl}$ ,  $K_{mnp}$  — кинетические константы скоростей реакций;  $C_{j,k,l,m,n,p}$  — содержания реагирующих реагентов.

Применительно к кинетической модели горения жидкого топлива, приведенной в [5], составлено еще 34 кинетических дифференциальных уравнений, которые входят в математическую модель горения жидкого топлива в кинетическо-диффузионной области.

Расчеты выполнены на ЭВМ БЭСМ-6 применительно к горению мазута в кинетическо-диффузионной области, аналогично, как показано в работе [5]. Приведем основные результаты расчетов.

На рис. 1 показано влияние рециркуляции дымовых газов на снижение выхода оксидов азота при двухступенчатом сжигании мазута. Как видно на рис. 1, рециркуляция дымовых газов в первичный воздух является достаточно эффективным средством снижения выхода оксидов азота. Так, например, для степени рециркуляции газов  $r_r = 30\%$  при горении жидкого топлива в кинетическо-диффузионной области снижение выхода оксидов азота составляет 0,54, а при горении в кинетической области — 0,62. Отсюда видно, что рециркуляция дымовых газов в кинетическо-диффузионной области горения жидкого

топлива снижает выход оксидов азота не в такой степени, как при горении в кинетической области. Это можно объяснить тем, что при горении в кинетическо-диффузионной области смешение газов происходит хуже, чем в кинетической области.

Расчеты показывают, что доля первичного воздуха при двухступенчатом сжигании жидкого топлива существенно влияет на выход оксидов азота. Оптимальная доля первичного воздуха находится в пределах 0,75–0,83, при которой выход оксидов азота имеет минимальное значение. Однако этот показатель по абсолютному значению несколько выше, чем при горении в кинетической области. Это можно объяснить неполным смешением топлива с воздухом при горении в кинетическо-диффузионной области.

Предложенная математическая модель горения жидкого топлива в кинетическо-диффузионной области позволяет исследовать влияние различных факторов на процесс горения топлива и выход оксидов азота и серы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Л о й ц н я н с к и й Л.Г. Механика жидкости и газа. – М., 1973. – 619 с. 2. Ж и х а р Г.И. Расчетное исследование горения жидкого топлива в циклонной камере // Изв. вузов. Энергетика. – 1982. – № 6. – С. 68–73. 3. Основы практической теории горения / Под ред. В.В.Померанцева. – Л.: Энергоиздат, 1986. – 300 с. 4. Процессы горения / Под ред. Б. Льюиса и др. – М., 1961. – 356 с. 5. Ж и х а р Г.И., Б о г д а н о в и ч И.Г., К е д а Н.П. Расчетное исследование образования оксидов азота и серы при сжигании мазута // Науч. и прикл. пробл. энергетики. – Мн.: Выш. шк., 1986. – № 13. – С. 27–41.