

## Библиографический список

1. Теория турбулентных струй / Г.Н.Абрамович, Т.А.Гиршович, С.Ю.Крашенинников и др. / Под ред. Г.Н.Абрамовича. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Наука, 1984. 716 с.
2. Гупта А., Лилли Д., Сайред Н. Закрученные потоки. М.: Мир, 1987. 588 с.
3. Абрамович Г.Н., Крашенинников С.Ю., Секунцов А.Н. Турбулентные течения при воздействии объемных сил и неавтомоделности. М.: Машиностроение, 1975. 96 с.
4. Шец Д. Турбулентное течение. Процессы вдува и перемешивания. М.: Мир, 1984. 247 с.
5. Адлер Д., Барон А. Расчет трехмерного течения круглой струи в поперечном потоке // РТК. 1979. № 2. Т. 17. С. 53-60.
6. Аэродинамика в вопросах и задачах / Н.Ф.Краснов, В.Н.Кошевой, А.Н.Данилов и др.; Под ред. Н.Ф.Краснова. М.: Высш. шк., 1985. 759 с.
7. Шандоров Г.Н. Расчет оси в сносящем потоке // Изв. вузов. Авиат. техника. 1966. № 2. С. 100-104.

УДК 66.023:66.094.412:532.527

Я.А.Сваровский

ПРОЦЕССЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ГОРЕНИЯ  
В ВИХРЕВЫХ ПОТОКАХ

(Сибирский филиал ВНИИМ)

Предпринята попытка сформулировать специфические особенности процесса фторирования элементарным фтором оксидов урана, циркония в вихревых потоках как химико-технологического приема в горении и обсудить некоторые особенности процесса.

ISBN 5-230-16926-5

Вихревой эффект  
и его применение в технике.  
Самара, 1992

Условные обозначения:  $\omega_{\text{вх}}$  - скорость на срезе сопла;  $\omega_{\varphi, z}$  - тангенциальная и осевая составляющие скорости газового потока;  $U_{\varphi, z}$  - тангенциальная и осевая составляющие скорости частицы;  $S_{\text{вх}}$  - площадь сопла;  $S_{\text{пр.п.}}$  - площадь сечения прямого потока;  $\rho_{\text{г,к}}$  - удельная плотность газа и частицы;  $\xi$  - коэффициент аэродинамического сопротивления;  $C_{\infty}$  - концентрация окислителя;  $\delta$  - радиус частицы;  $K_0$  - предэкспонент;  $E$  - энергия активации;  $Q$  - тепловой эффект реакции;  $R$  - универсальная газовая постоянная;  $D$  - коэффициент диффузии;  $\lambda_{\text{г}}$  - коэффициент теплопроводности газа;  $T_{\text{к,г}}$  - температура частицы и газа;  $n$  - число частиц в единице объема;  $Re$  - критерий Рейнольдса;  $Nu$  - критерий Нуссельта;  $M$  - стехиометрическое соотношение;  $\beta$  - стехиометрический коэффициент.

В практическом использовании процессов горения можно выделить энергетическое и химико-технологическое направления. Первое получило широкое развитие, а химико-технологическое направление сводилось лишь к разработке отдельных процессов в отрыве от теории горения. Определение и понимание факторов скорости горения в технологических процессах позволит создать эффективные методы управления процессами через регулирование температуры, давления и концентраций фаз в зоне реакции.

Для промышленного применения в урановом производстве разработаны пламенные реакторы с прямоточными струями фтора в реакционном слое, отличающиеся высокими скоростью реакции и рабочей температурой реагирующей смеси [1].

В аппаратах с тангенциальным подводом фтора, позволяющим изменять параметры закрутки потока  $\varphi$ , в отличие от прямоточных струй, увеличивается интенсивность смешения, время и поверхность взаимодействия фтора с сырьем, скольжение частиц твердой фазы во фторе. Эти факторы значительно интенсифицируют процесс фторирования и при критической скорости фтора на срезе сопла позволяют получить оптимальные условия процесса в режиме горения.

Химический механизм фторирования оксидов урана и циркония с анализом промежуточных продуктов достаточно широко изучен [2]. Результаты исследований влияния закрутки двухфазного потока на процесс фторирования оксидов редкоземельных элементов и аппаратурное оформление процесса приводятся в работе [3]. Изучение макрокинетического механизма фторирования оксидов урана и циркония в вихревых потоках фтора и разработка эффективных приемов организации процесса фторирования для химико-технологических целей представляют научный и практический интерес. Учитывая особую сложность экспериментальных работ в агрессивной среде со фтором, фторидами урана и циркония, проведено численное исследование макрокинетики процесса фторирования со следующими предположениями: частицы одинакового размера равномерно распределены в газе и взаимодействуют друг с другом через газ; на поверхности частиц протекает гетерогенная реакция между фтором и веществом частиц; градиент температуры в частице равен нулю; описание дисперсной системы происходит в рамках модели сплошной среды. Задача решается в области прямого тока без учета рециркуляции по оси канала.

С учетом перечисленных предложений в расчетах использовались следующие уравнения [4]:  
 движения газовой среды

$$\begin{aligned} \omega_{\varphi} z &= C_1, & C_1 &= \omega_{\delta x} R_K, \\ \omega_z &= C_2, & C_2 &= \frac{\omega_{\delta x} S_{\delta x}}{S_{np.n.}}; \\ \omega_z &= 0, \end{aligned}$$

движения частиц

$$\frac{d\omega_{\varphi}}{dt} = \frac{3}{4} \frac{\rho_r}{\rho_k} \xi \frac{(\omega_{\varphi} - v_{\varphi})}{\delta} \sqrt{(\omega_{\varphi} - v_{\varphi})^2 + (\omega_z - v_z)^2};$$

$$\frac{d\omega_z}{dt} = \frac{3}{4} \frac{\rho_r}{\rho_k} \xi \frac{(\omega_z - v_z)}{\delta} \sqrt{(\omega_{\varphi} - v_{\varphi})^2 + (\omega_z - v_z)^2},$$

горения частицы

$$\frac{d\delta}{dt} = -C_{\infty} \frac{\frac{NuD}{2\delta} k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT_k}\right) 2\rho_r}{\left[\frac{NuD}{2\delta} + k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT_k}\right)\right] M\beta\rho_k},$$

$$Nu = 2(1 + 0,08 Re^{0,25});$$

теплообмена между частицами и газом

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{4}{3} \pi C_k \rho_k \frac{d}{dt} (\delta^3 T_k) = 4 \pi \delta^2 Q C_\infty \frac{K_0 \varepsilon^{-\frac{E}{RT_k}} \frac{Nu D}{2\delta}}{\left( K_0 \varepsilon^{-\frac{E}{RT_k}} + \frac{Nu D}{2\delta} \right)} - \\ - 4 \pi \delta^2 \frac{Nu \lambda_r}{2\delta} (T_k - T_r), \\ C_r \rho_r \frac{dT_r}{dt} = \frac{Nu \lambda_r}{2\delta} 4 \pi \delta^2 n (T_k - T_r). \end{array} \right.$$

Систему уравнений решали численно на ЭВМ БЭСМ-6 методом Рунге-Кутты со следующими начальными условиями:

$$T_r(0) = T_0, T_k(0) = T_{ок}, v_\varphi(0) = 0, z(0) = 0, v_z(0) = 0, \delta(0) = \delta_0;$$

$$\omega_\varphi = \omega_{вх}, \omega_z = \frac{\omega_{вх} S_{вх}}{S_{гг.п.}}$$

Численные исследования проведены для частиц оксидов урана радиусом  $\delta = 0,25-0,5 \cdot 10^{-4}$ ,  $0,1-0,2 \cdot 10^{-3}$  м при  $E = 18440$  кал/моль;  $\beta = 0,37$ ;  $K_0 = 5 \cdot 10^{-4}$  см/с;  $\lambda_r = 12 \cdot 10^{-5}$  кал/см·с·град;  $Q = 15440$  кал/см<sup>3</sup>;  $\rho_k = 8,3$  г/см<sup>3</sup>;  $D = 0,2$  см<sup>2</sup>/с;  $\rho_r = 1,7 \cdot 10^{-3}$  г/см<sup>3</sup>;  $C_r = 0,2$  кал/г·град;  $C_k = 0,06$  кал/г·град;  $T_{гн} = 400$  К;  $T_{кн} = 300$  К.

Развитие процесса воспламенения и горения частиц оксидов урана во фторе показано на рис. I и разделяется на три стадии:

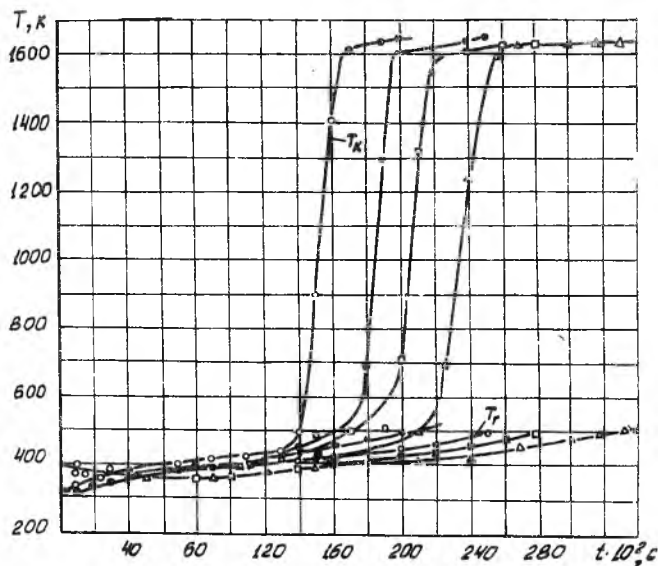
инертный прогрев частиц до температуры  $\sim 354$  К;

квазистационарный разогрев смеси, когда в каждый момент времени между частицами и газом существует тепловое равновесие ( $T_k \sim T_r$ ) медленно сдвигающееся со временем в область более высоких температур;

диффузионный режим горения.

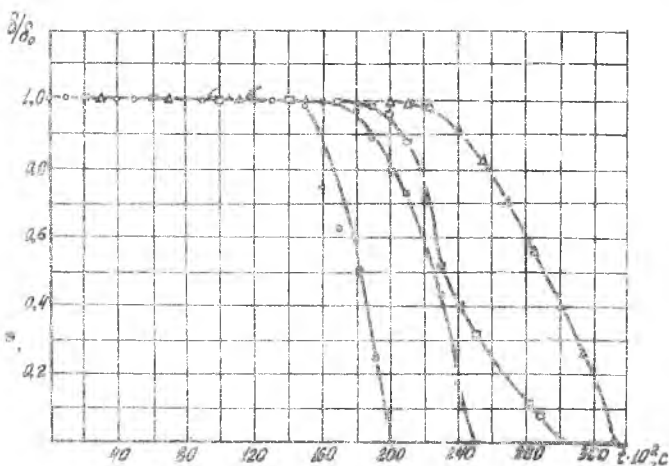
В момент достижения частицами оксида урана температуры воспламенения  $T_g \approx 600$  К тепловое равновесие между частицами и фтором не может далее существовать, так как теплоприход от химических реакций уже не компенсируется теплоотводом в газ, вследствие

этого температура частиц резко повышается и они сгорают в диффузионном режиме горения. В этом режиме горения температура частиц  $T_K$  намного больше температуры газа, так  $T_K \approx 1650$  К,  $T_r$  достигает только  $\sim 500$  К. Более мелкие частицы радиусом  $\delta = 0,25-0,5 \cdot 10^{-4}$  м сгорают в диффузионном режиме через  $2...2,5$  с, частицы  $\delta = 0,1-0,2 \cdot 10^{-3}$  м через  $3...3,3$  с при тех же температурах.



Р и с. 1. Зависимость температур частиц  $T_K$  и газа  $T_r$  от времени при фторировании  $U_3O_8$

Приведенная на рис. 2 зависимость изменения радиуса частицы оксида урана от времени показывает, что частицы в кинетическом режиме практически не выгорают ( $\delta/\delta_0 = 1$ ), основное их выгорание при критической скорости фтора происходит в диффузионном режиме в течение 30–40% от всего времени горения частиц, а лимитирующей стадией является инертный прогрев частиц с квазистационарным разогревом смеси.



Р и с. 2. Зависимость выгорания частиц  $r/r_0$  от времени при фторировании  $U_3O_8$  для  $\delta_0$ :  $\circ$  -  $0,25 \cdot 10^{-4}$  м;  $\square$  -  $0,5 \cdot 10^{-4}$  м;  $\triangle$  -  $0,1 \cdot 10^{-3}$  м;  $\diamond$  -  $0,2 \cdot 10^{-3}$  м

Результаты расчетов для оксида циркония с размерами частиц  $\delta = 0,25-0,5 \cdot 10^{-4}$  м и  $0,1$  м при  $E = 27,2$  ккал/моль,  $Q = 266,1$  ккал/моль,  $K_0 = 1,67 \cdot 10^5$  л/с показали, что воспламенение частиц, как и при фторировании оксидов урана, разделяется на стадии прогрета частиц, квазистационарного разогрева смеси и диффузионного режима горения. Так частицы радиусом  $\delta = 0,25 \cdot 10^{-4}$  м воспламеняются при  $T_K = 490$  К,  $T_r = 480$  К через  $1,4$  с и сгорают при  $T_K = 1560$  К,  $T_r = 680$  через  $0,7$  с. Частицы с  $\delta = 0,5 \cdot 10^{-4}$ ;  $0,1 \cdot 10^{-3}$  м воспламеняются соответственно через  $1,5$  и  $1,6$  с и сгорают через  $1,2$  и  $1,5$  с при тех же температурах.

Отсутствие точных экспериментальных данных о процессе фторирования частиц оксидов урана, циркония в вихревых потоках не позволяет провести полное сравнение полученного решения с экспериментом. Некоторые сведения о температурном режиме при воспламенении и горении оксидов урана  $T_B \approx 600$  К и  $T_K \approx 1780$  К близки к расчетным.

Механизм воспламенения частиц в слабозакрученных потоках фтора связан с разогревом оксидов только из-за протекания в потоке экзотермической реакции.

В сильнозакрученных потоках при определенных значениях параметра  $\varphi$ , скорости реакции и теплового эффекта на воспламенение частиц оказывает влияние обратный поток горячих частиц из рециркуляционной зоны, что приводит к сокращению кинетического режима фторирования, значительному смещению реакционной зоны к устьевому сечению и уменьшению длины вихревого канала реактора.

Кроме того, закрутка потока соответствует более интенсивному протеканию реакции фторирования в приосевой области и повышению там концентрации летучих соединений фторидов. Увеличение эффективности фторирования на оси вихревого канала с ростом параметра  $\varphi$  сопровождается уменьшением концентрации на периферии, что усредняет влияние закрутки потока на среднерасходную концентрацию фтористых соединений.

Решение этой задачи составит предмет дальнейшего исследования. Полученные данные могут быть использованы в практических расчетах.

#### Библиографический список

1. С уд а р и к о в Б.Н., Р а к о в Э.Г. Процессы и аппараты урановых производств. М.: Машиностроение, 1969. 381 с.
2. Материалы V Всесоюзного симпозиума по химии неорганических фторидов. Днепропетровск, 1978. 312 с.
3. К а р е л и н А.И., С в а р о в с к и й А.Я. Вихревой реактор для процессов фторирования оксидов редкоземельных элементов //Тр. V Всесоюз. конф. "Вихревой эффект и его применение в технике". Куйбышев, 1988. С. 145-150.
4. К а р е л и н А.И., К о л м а к о в А.Д., С в а р о в с к и й А.Я., З у р е р А.Б., С о л о в ь е в А.И. Исследование процесса фторирования оксидов РЗЭ в вихревых потоках //Горение конденсированных систем /Ин-т химической физики АН СССР. Черноголовка. 1977. С. III-III3.