

нов. - Электрические станции, 1979, № 11, с. 16-22.  
 2. М.И.Гитман, Г.А.Маслова. Зависимость технико-экономических показателей ТЭИ от глубины разгрузки в минимум электрических нагрузок. - Электрические станции, 1980, № 6, с. 53-58.

УДК 66.074.8

Л.В.Шатон, инженер, В.И.Чернышев, инженер,  
 А.П.Несенчук, канд. техн. наук (БПИ)

### ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ ДЕСОРБЦИИ УГЛЕКИСЛОТЫ ИЗ ЧАСТИЦ ЦЕОЛИТА СаА ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ТЕПЛОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

В десорберах, использующих принцип псевдооживления мелко-дисперсного сорбента потоком десорбируемого газа [1], частицы сорбента нагреваются в процессе соприкосновения с греющей поверхностью. При этом каждая частица получает тепловой импульс, энергия которого частично рассеивается в процессах межфазовой релаксации, а частично компенсирует энергию, поглощаемую в процессе отрыва молекул сорбата от поверхности сорбента. Кинетика охлаждения частицы целиком определяет скорость выделения газообразного сорбата.

Коэффициент диффузии выражается зависимостью [2]

$$D = D_0 e^{-\frac{E_a}{RT}}, \quad (1)$$

где в числителе экспоненты содержится энергия взаимодействия молекулы сорбата с поверхностью цеолита  $E_a$ , а  $D_0$  определяется внутренней структурой кристалла цеолита. Для системы углекислота — цеолит СаА обе величины исследованы мало. Кроме того, до настоящего времени практически не исследован процесс переноса тепла внутри кристаллов цеолита, определяемый коэффициентом теплопроводности  $\lambda_{эфф}$ . Эти обстоятельства вызвали необходимость экспериментального исследования кинетики десорбции при импульсном тепловом воздействии.

Математическая формулировка процессов переноса массы сорбата и энергии внутри сферической частицы радиуса  $R_0$  в сферических координатах представляется так:

$$\frac{da}{dt} = \frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} r^2 D_0 e^{-\frac{E_a}{RT}} \frac{da}{dr}; \quad (2)$$

$$\rho_{\tau c} \frac{dT}{dt} = \frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} r^2 \lambda \frac{dT}{dr} + \rho_{\tau E} \frac{da}{dt}, \quad (3)$$

где  $a$  - плотность сорбата, отнесенная к плотности твердого сорбента.

Записываем начальные и граничные условия

$$a \Big|_{r \leq R_0} \Big|_{t=0} = a_0; \quad \frac{da}{dr} \Big|_{r=0} = 0; \quad a \Big|_{r=R_0} = 0; \quad (4)$$

$$\Big|_{t \geq 0} \Big|_{r=0} = 0; \quad \Big|_{t \geq 0} \Big|_{r=R_0} = 0;$$

$$T \Big|_{r \leq 0} \Big|_{t=0} = T_0; \quad \frac{dT}{dr} \Big|_{r=0} = 0; \quad T \Big|_{r=R_0} = \begin{cases} T_H & \text{для } 0 \leq t \leq t_H; \\ T_0 & \text{для } t > t_H. \end{cases} \quad (5)$$

Эти условия выражают процесс релаксации концентрации сорбата в частице от начальной концентрации  $a_0$  в вакуум. Кроме того, на частицу воздействует импульс температуры с амплитудой  $T_H$  и длительностью  $t_H$ .

Система (2)-(5) отличается сильной нелинейностью и решалась численно на ЕС ЭВМ.

Схема экспериментальной установки для исследований десорбции при импульсном тепловом воздействии изображена на рис. 1.

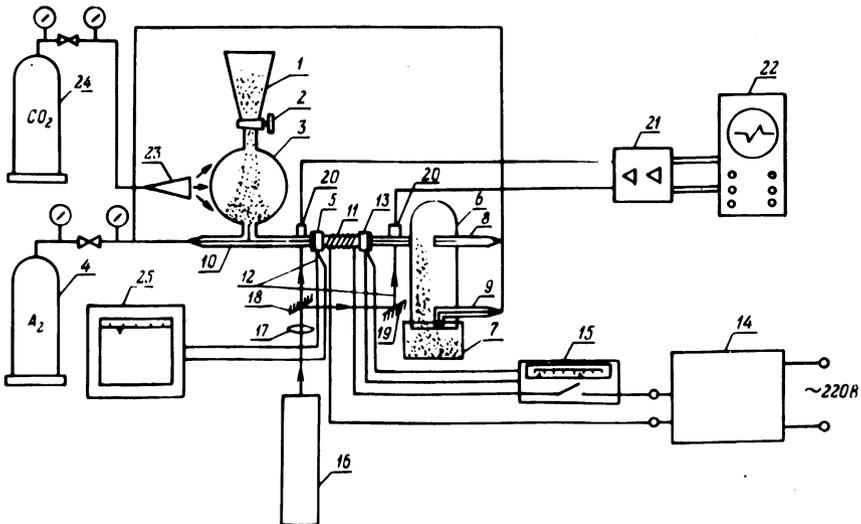


Рис. 1. Общий вид экспериментальной установки.

Методика эксперимента заключалась в следующем. Частицы СаА, заранее прокаленные в печи при температуре 350–400°С и насыщенные углекислотой до значения  $a$ , засыпались с помощью воронки 1 в верхний сосуд 3, заполненный аргоном. Аргон в сосуд 3 поступал из баллона 4. В эксперименте использовались частицы со средним диаметром порядка 0,3 мм. Сосуд 3 в ходе эксперимента охлаждался углекислотой, поступающей через сопло 23 из баллона 24. Аргон из баллона 4 поступает в трубку 10, увлекая за собой частицы из сосуда 3. Частицы цеолита, проходя нагревательный участок 5, попадают в нижний сосуд 6 и бюкс 7. Трубка 11, сосуд 6 и бюкс 7 охлаждаются аргоном с помощью трубок 8 и 9. Диаметр каналов 10, 5 и 11 составляет 0,5 мм (приблизительно равен диаметру частицы), что обеспечивает хороший тепловой контакт частиц со стенками канала 5, который выполнен из латуни. Канал 5 обогревается помещенным на его внешней стороне нагревателем, подключенным к регулируемому мосту 15 и источнику тока 14. Температура канала фиксируется двумя термомпарами 12, одна из которых подключена к регулируемому мосту 15, а другая к потенциометру 25. Канал 5 теплоизолирован от элементов 10 и 11 с помощью специальных прокладок 13. Время  $t_H$  пролета частицы по каналу 5 регистрировалось фотометрическим способом. Луч лазера 16 фокусировался линзой 17 на датчиках 20. Луч раздваивался полупрозрачными 18 и обычными 19 зеркалами. Раздвоенный луч проходит через центры трубок 10 и 11 так, что каждая пролетающая частица создает тень на фототранзисторах 20. Для более четкой регистрации частиц в схему встроены блок нормирования импульсов, обеспечивающий стандартную длительность и амплитуду каждого импульса, поступающего на осциллограф 22.

В ходе эксперимента порция частиц из сосуда 3 продувалась аргоном через каналы 10, 5 и 11 в бюкс 7. Время эксперимента фиксировалось секундомером.

В течение эксперимента частица теряла некоторое количество углекислоты, которое определялось двумя факторами: все частицы в каналах 10, 5 и 11 и сосудах 6 и 7 находились под практически нулевым парциальным давлением (по углекислоте) за счет интенсивного продувания аргоном и, кроме того, скорость десорбции определяется температурой.

Среднюю степень десорбции определяли в конце эксперимента посредством двух взвешиваний сосуда 7 с частицами цеолита с промежуточным прокаливанием их в нем.

Результаты серии экспериментов приведены в табл. 1. Их обработка выполнялась в соответствии с (2)-(5), а также полученным авторами ранее выражением для коэффициента диффузии

$$D = 1,41 \cdot 10^{-6} e^{-\frac{29750}{8,314T}} \quad (6)$$

Расчеты показали, что коэффициент теплопроводности цеолита близок к коэффициенту теплопроводности песка. Профиль температуры в частицах диаметром  $10^{-3}$ - $10^{-4}$  м релаксирует за

Таблица 1.  
Сравнение результатов экспериментов и численной модели десорбции при импульсном нагреве

Температура канала 5 $T_n^P, C$	Время эксперимента, $t_{\text{эксп}}, c$	Степень десорбции (экспериментальные значения) $a_{\text{эксп}}, \frac{\text{кг CO}_2}{\text{кг CaA}}$	Степень десорбции (расчетные значения) $a_{\text{расч}}, \frac{\text{кг CO}_2}{\text{кг CaA}}$	$\frac{a_{\text{эксп}} - a_{\text{расч}}}{a_0}, \%$
$a_0 = 0,0825, t_n = 0,6 c$				
25	196	0,0305	0,0335	-3,6
150	180	0,0306	0,0304	+0,2
200	173	0,0264	0,0260	+0,5
250	152	0,0228	0,0207	+2,5
300	152	0,0134	0,0138	-0,5
350	122	0,0142	0,0088	+6,5
$a_0 = 0,0615, t_n = 0,1 c$				
25	95	0,0300	0,0344	-7,1
150	117	0,0309	0,0312	-0,5
200	108	0,0273	0,0308	-5,7
250	109	0,0295	0,0288	+1,1
300	108	0,0278	0,0262	+2,6
350	121	0,0252	0,0224	-5,7
$a_0 = 0,0335, t_n = 0,1 c$				
25	102	0,0180	0,0183	-0,9
150	105	0,0165	0,0173	-3,3
200	112	0,0192	0,0166	+7,7
250	108,5	0,0152	0,0157	-1,5
300	94	0,0147	0,0148	-0,3
350	118	0,0124	0,0123	+0,3

время порядка сотых долей секунды. Все это указывает, что нет необходимости включать в расчеты уравнения (3) и (5), а использовать приближение тепловой релаксации и балансные соотношения энергии при определении температуры частиц. Влияние теплоты десорбции на кинетику процесса проявляется только при нагреве частиц с коэффициентом внешнего теплообмена менее  $100 \text{ Вт/м}^2 \text{ К}$ . Время же диффузионной релаксации сильно зависит от температуры частиц и на несколько порядков превышает время тепловой релаксации.

### Литература

1. Романюк В.Н., Несенчук А.П. Интенсификация непрерывного процесса тепловой десорбции. – Рукопись деп. в ВИНТИ. – М., 1979, № 6. – 77 с. 2. Брек Д. Цеолитовые молекулярные сита. – М.: Мир, 1976.

УДК 662.76

В.С.Северянин, канд. техн. наук,  
М.Г.Горбачева, инженер (БИСИ)

### ОБ ЭМИССИИ ОКИСЛОВ АЗОТА ПРИ ПУЛЬСИРУЮЩЕМ ГОРЕНИИ

Известно, что концентрация окислов азота в продуктах сгорания зависит от температуры факела, времени пребывания газов в зоне высоких температур, от содержания кислорода в зоне горения [1]. Наибольшее влияние на выход окислов азота оказывает температура [2]:

$$C_{\text{NO}} = 4,6 \sqrt{C_{\text{O}_2} \cdot C_{\text{N}_2}} \exp\left(-\frac{21500}{R\theta}\right),$$

где  $C_{\text{NO}}$  – равновесная концентрация окиси азота;  $C_{\text{O}_2}$  и  $C_{\text{N}_2}$  – концентрация кислорода и азота в продуктах сгорания;  $\theta$  – температура в зоне реакции.

Одним из форсированных методов сжигания является пульсирующее горение. При этом способе сжигания топлива существенно снижается температура в зоне горения. Количественно это снижение можно охарактеризовать следующим образом.

Кинетическая энергия элементарной массы потока

$$dE = \frac{W^2}{2} dm,$$

где  $dm = \rho dV = \rho \cdot S \cdot W \cdot d\tau$ .