

## ЛИТЕРАТУРА

1. Теплотехнология металлургических мини-заводов / В. И. Тимошпольский, А. Б. Стеблов, В. Б. Ковалевский и др. — Мн., 1992.
2. Тепловые и теплодеформационные процессы при форсированном нагреве стали / Ю. А. Малевич, В. Н. Папкович, П. В. Севастьянов и др. // ИФЖ. — 1990. — Т. 58, № 3. — С. 402–405.
3. Ковалевский В. Б. и др. Определение расхода топлива на основе теплового баланса для печей непрерывного действия // ИФЖ. — 1996. — Т. 69, № 2. — С. 285–290.

Представлена кафедрой  
ПОВТ и АС

Поступила 24.01.2000

УДК 536.244+621.032

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ СКОРОСТИ ДЕСОРБЦИИ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ НАГРЕВЕ МИКРОСФЕРИЧЕСКОЙ ЧАСТИЦЫ ЦЕОЛИТА

Докт. техн. наук, проф. **НЕСЕНЧУК А. П.**,  
канд. техн. наук, проф. **КОПКО В. М.**,  
инженеры **ШКЛОВЧИК Д. И.**, **РЫЖОВА Т. В.**, **АЙДАРОВА З. Б.**

*Белорусская государственная политехническая академия*

Исходным физическим представлением десорбции был процесс диффузии адсорбата в зерне адсорбента из центра на внешнюю поверхность. В эксперименте измерялась степень десорбции. Варьируемыми параметрами являлись: температура греющей стенки; начальная адсорбция цеолитом диоксида углерода и время теплового импульса.

Основное содержание эксперимента заключалось в том, что каждое из зерен цеолита с фиксированной величиной начальной адсорбции  $a_0$  помещалось в атмосферу аргона с нулевым парциальным давлением  $\text{CO}_2$  и, кроме того, получало тепловой импульс фиксированной длительности. Эти два фактора определяли степень десорбции  $\text{CO}_2$  из зерен цеолита MgA — БС (ИГ-931).

Общая схема экспериментальной установки изображена на рис. 1 и 2. Зерна цеолита определенной степени насыщения  $\text{CO}_2$  засыпались в бункер 1. Через кран 2 они попадали в камеру 3. После того как весь цеолит оказывался в ней, из баллона 4 в установку подавался аргон, который, как известно, практически поглощается цеолитом. При этом кран открыт настолько, чтобы камера непрерывно продувалась аргоном и там создавался псевдооживленный слой сорбента, а зерна цеолита всасывались в патрубок-канал 10. Прохождение частицы в нем фиксируется фототранзистором 20, на который подается пучок света от лазера 16 через оптическую систему 17, 18 и 19. Из канала 10 частица попадает в латунный канал 5, обогреваемый от источника постоянного тока 14 (Б5-7). Температура канала регулируется. Контроль осуществляется

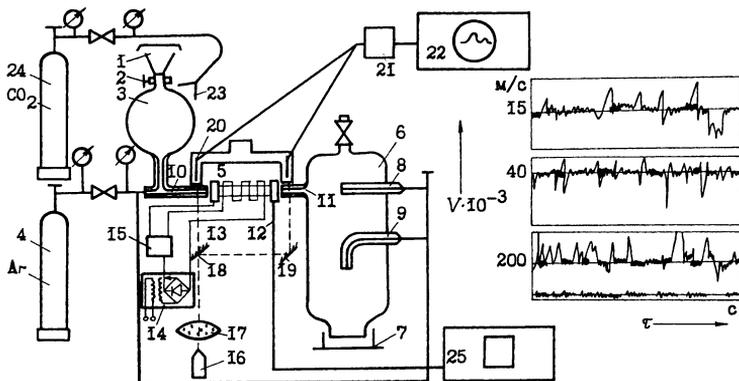


Рис. 1. Схема установки для импульсного нагрева зерен цеолитов CaA и MgA

с помощью двух хромелькопелевых термопар 12, зачеканенных в толще канала 5 вблизи внутренней стенки. Одна из термопар соединена с самопишущим потенциометром 25 (ПС1-11), другая — с регулирующим потенциометром 15 (МР-64-02), управляющим током выпрямителя 14 типа Б5-7. Канал 5 теплоизолирован тефлоновыми прокладками 13 от входного и выходного стеклянных патрубков 10 и 11. В канале частица цеолита быстро нагревается, так как внутренний его диаметр равен 0,5 мм, т. е. немногим больше диаметра частицы. Из горячего канала 5 частица попадает в холодный канал 11, а затем — в холодный поток аргона из трубки 8, быстро охлаждаясь. Момент прохождения частицей канала 11 фиксируется фототранзистором 20. Сигналы от обоих фототранзисторов поступают через схему формирования импульсов (рис. 2) на электронный осциллограф 22 (С1-18), экран которого фотографируется. Из камеры 6 поток зерен цеолита и аргон из патрубков 11, 8, 9 поступают в бокс 7. Зерна цеолита остаются в нем, а аргон проходит между стенкой бокса и камерой в атмосферу. Во избежание нагрева камеры 3 от горячего канала 5 она непрерывно обдувалась холодным потоком углекислоты через патрубок 23 из баллона 24.

Специально разработанная схема формирования импульсов, поступающих от двух фотодатчиков рис. 2, включает усилительный каскад, собранный на транзисторе Т<sub>3</sub>, управляющий током последовательно со-

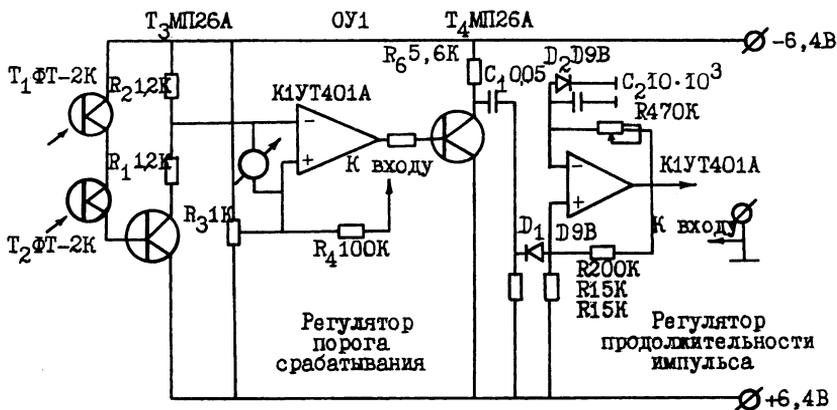


Рис. 2. Схема формирования импульса в эксперименте по изучению кинетики десорбции при импульсном нагреве зерен цеолитов CaA и MgA

единенных фототранзисторов  $T_1$  и  $T_2$ . В отсутствие пролетающих по каналу частиц оба фототранзистора открыты и через них протекает ток базы транзистора  $T_3$ . Транзистор  $T_3$  открыт, и на вход операционного усилителя ОУ1 поступает некоторое положительное напряжение с делителей  $R_1$  и  $R_2$ , включенных в коллекторную сеть транзистора  $T_3$ . Это напряжение управляет триггером Шмитта, собранным на операционном усилителе ОУ1. Порог срабатывания триггера регулируется потенциометром  $R_3$  и выбирается так, чтобы в стационарном режиме напряжение на неинвертирующем входе ОУ1 было на несколько сотых вольт меньше, чем напряжение, поступающее с выхода предыдущего каскада. Эта разность контролируется цифровым вольтметром В7-21А/1. Таким образом, отрицательное напряжение на выходе триггера сменяется положительным в момент пролета частицы перед одним из фотодатчиков. Инвертирующий каскад собран на транзисторе  $T_4$ . Сопротивление  $R_5$  ограничивает ток базы транзистора  $T_4$ , влияющий на работу триггера. Через разделительный конденсатор  $C_1$  импульс поступает на вход ждущего мультивибратора, собранного на операционном усилителе ОУ2. Ждущий мультивибратор формирует импульс стандартной амплитуды и длительности, определяемой цепью  $C_2$  и  $R_9$ . Длительность регулируется переменным сопротивлением  $R_{10}$ . С выхода мультивибратора импульс поступает на вход электронного осциллографа С1-18. Экран осциллографа фотографировался (рис. 1). Подробности работы триггера и ждущего мультивибратора описаны в [1].

Луч монохроматического излучения лазера проходит через линзу  $L_1$ , фокус которой находится в центре стеклянной трубки 3. После линзы луч раздваивается системой зеркал (полупрозрачного 6 и обыкновенного 7) и проходит через входной 10 и выходной 11 каналы. Так как, проходя через трубку, луч многократно отражается от поверхности раздела оптических сред и рассеивается, а нам нужна только та часть, которая проходит через центральный канал, за трубками 10 и 11 установлены диафрагмы глубиной 5 мм и диаметром 0,5 мм. После диафрагм оптический сигнал преобразуется в электрический с помощью фототранзисторов 20 (ФТ-2К).

До начала серийных экспериментов все приборы проходили поверку в Госкомтехнадзоре.

После прогрева установки и приборов выставлялся порог срабатывания триггера Шмитта. Цеолит определенной степени насыщения, приготовленный по методике, описанной выше, помещался в бункер (рис. 1) и затем через открытый кран 2 попадал в сосуд 3. Фиксировалось время, и открывался баллон 4 с аргоном. На регуляторе прибора 14 (МР-64-02) выставлялась температура канала, и закрывался кран до положения, когда поток аргона начинал засасывать частицы цеолита в канал 5. После прохождения всей порции цеолита из сосуда 3 в бюкс 7 вновь фиксировалось время. Бюкс закрывался крышкой и взвешивался для проведения первого этапа определения остаточного содержания  $CO_2$  согласно описанной выше методике. Во время перетока цеолита из сосуда в бюкс несколько раз производилось фотографирование экрана осциллографа.

Для обработки результатов эксперимента, описанного выше, была предложена модель тепло- и массообмена на основе двух уравнений пе-

реноса для сферы с граничными условиями первого рода. Они представляют собой уравнение диффузии в сферических координатах и уравнение энергии:

$$\frac{da}{dt} = \frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left[ r^2 D_0 \exp\left(-\frac{E_0}{RT}\right) \frac{da}{dr} \right]; \quad (1)$$

$$\rho_T c_T \frac{dT}{dt} = \frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left[ r^2 \lambda_T \frac{dT}{dr} + \rho_T H_a \frac{da}{dr} \right]; \quad (2)$$

$$a_{t=0} = a_0; \quad T_{t=0} = T_0; \quad (3)$$

$$a_{r=r_0} = 0; \quad \left( \frac{da}{dr} \right)_{r=0} = 0; \quad \left( \frac{dT}{dr} \right)_{r=0} = 0; \quad (4)$$

$$\begin{aligned} T_{r=r_0} &= T_H && - \text{при } 0 = t \leq t_H; \\ T_{r=r_0} &= T_0 && - \text{при } 0 = t > t_H. \end{aligned} \quad (5)$$

В (1)...(5) учитываются температурная зависимость коэффициента диффузии и теплота десорбции. Влиянием термодиффузионной составляющей коэффициента теплопроводности пренебрегаем, так как она намного меньше теплопроводности кристаллической решетки.

Условие (5) задает тепловой импульс длительностью и амплитудой  $T_H$ , а условие (4) отражает тот факт, что парциальное давление сорбата вокруг частицы равно нулю.

Модели, частично похожие на (1)...(5), известны в литературе. Однако в них не учитывалась температурная зависимость коэффициента диффузии, и уравнение энергии усреднялось по объему. Кроме того, модель (1)...(5) отличается от моделей, предложенных в ранних работах.

Для нахождения средней адсорбции порции цеолита, участвующего в эксперименте, делалось усреднение

$$\bar{a} = \frac{3}{t_{\text{exp}}} \int_0^{t_{\text{exp}}} \int_0^{r_0} a(r, t) r^2 dr dt.$$

Усреднение по времени эксперимента  $t_{\text{exp}}$  необходимо, так как частицы пролетают канал не одновременно, а по очереди на протяжении всего опыта.

Нелинейность модели (1) ... (5) делает невозможным точное ее решение. Приближенное решение находилось численно при помощи разностной аппроксимации с четырехточечной неявной схемой решения.

Результаты обработки экспериментов по импульсному нагреву частиц цеолита MgA сведены в табл. 1.

Численная модель показывает неплохое совпадение с экспериментом.

Таблица 1

## Сравнение результатов эксперимента и численного моделирования процесса десорбции при импульсном нагреве

$T_0=25$ °C	$a_0 = 0,0825; t_H = 0,6$ с				$a_0 = 0,615; t_H = 0,1$ с				$a_0 = 0,0335; t_H = 0,1$ с			
$T_H$ , °C	$t_{\text{exp}}$ , °C	$a_{\text{exp}}$ , кг/кг	$a_p$ , кг/кг	$\frac{a_{\text{exp}} - a_p}{a}$ , %	$t_{\text{exp}}$ , °C	$a_{\text{exp}}$ , кг/кг	$a_p$ , кг/кг	$\frac{a_{\text{exp}} - a_p}{a}$ , %	$t_{\text{exp}}$ , °C	$a_{\text{exp}}$ , кг/кг	$a_p$ , кг/кг	$\frac{a_{\text{exp}} - a_p}{a}$ , %
25	196	0,0305	0,0335	-3,6	95	0,0300	0,0344	-7,1	102	0,0180	0,0183	-0,9
150	180	0,0306	0,0304	0,2	117	0,0309	0,0312	-0,5	105	0,0165	0,0176	-3,3
200	173	0,0264	0,0260	0,5	108	0,0273	0,0308	-5,7	112	0,0192	0,0166	7,7
250	152	0,0288	0,0207	2,5	109	0,0295	0,0288	1,1	108,5	0,0152	0,0157	-1,5
300	152	0,0134	0,0138	-0,5	108	0,0278	0,0262	2,6	94	0,0147	0,0148	-0,3
350	122	0,0142	0,0088	6,5	121	0,0252	0,0224	-5,7	118	0,0124	0,0123	0,3

Примечание.  $t_{\text{exp}}$  — время эксперимента;  $a_{\text{exp}}$  — степень десорбции, полученная экспериментально (кг  $\text{CO}_2$ /кг MgA);  $a_p$  — степень десорбции, полученная расчетом (кг  $\text{CO}_2$ /MgA-БС(И-931));  $T_H$  — температура нагреваемого канала;  $t_H$  — время нагрева, с.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Угрозов В. В., Золотарев П. П. О теоретическом описании кинетики адсорбции на сферических гранулах сорбента в случае изотермы Френдлиха // Изв. АН СССР. Сер. «Химия». — 1981. — № 8. — С. 1705–1711.

Представлена кафедрой  
промотеплоэнергетики и  
теплотехники

Поступила 3.04.2000