

*П.В. Балабанов, С.В. Пономарев*

### ТЕПЛОЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ КИНЕТИКИ ПРОЦЕССА РЕГЕНЕРАЦИИ

Исследованию кинетики процессов адсорбции и хемосорбции посвящено большое количество работ [1 – 4]. В настоящей работе предлагается тепловой метод для исследования кинетики процесса регенерации воздуха цилиндрическим насыпным слоем регенеративного вещества, через который в одном направлении продувается газовая смесь с парами воды и углекислым газом в пульсирующем режиме.

Известно, что процесс хемосорбции в этом случае описывается системой уравнений массо-теплопереноса.

Перенос массы определяется системой уравнений [5–6]:

$$\frac{\partial c}{\partial \tau} + w \frac{\partial c}{\partial z} = D \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial c}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right] - \frac{\partial a}{\partial \tau}; \quad (1)$$

$$\frac{\partial a}{\partial \tau} = \beta c \Phi(a/a_0), \quad (2)$$

где  $a, a_0$  – текущее и предельное значения поглощения реагента;  $w$  – средняя по сечению скорость потока газа;  $D$  – коэффициент диффузии;  $\beta$  – коэффициент массообмена;  $\tau$  – время;  $z$  – продольная координата;  $c$  – текущая концентрация реагента;  $\Phi$  – функция, показывающая зависимость скорости поглощения реагента от количества оставшегося в твердой фазе активного вещества.

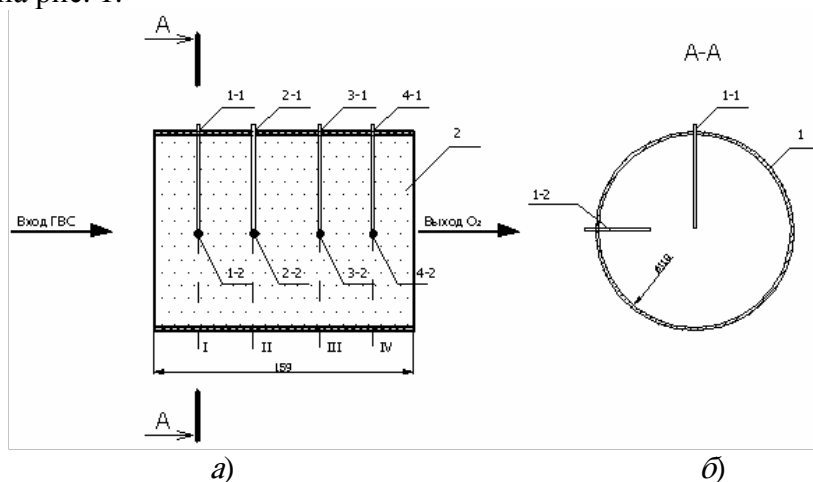
Мощность внутренних источников тепла при хемосорбции равна

$$q_v(z, \tau) = H_{\Sigma} \frac{\partial a}{\partial \tau}, \quad (3)$$

где  $H_{\Sigma}$  – суммарный тепловой эффект химических реакций.

Таким образом, мощность внутренних источников прямо пропорциональна скорости химической реакции, а определение  $q_v(z, \tau)$  в различных сечениях слоя дает представление о виде уравнения кинетики в данном сечении и, в конечном итоге, о виде уравнения, которым можно описать интегральную скорость хемосорбции.

Для определения вида краевой задачи теплопереноса в цилиндрическом слое регенеративного вещества были выполнены эксперименты на специально изготовленном цилиндрическом макете, схема которого изображена на рис. 1.



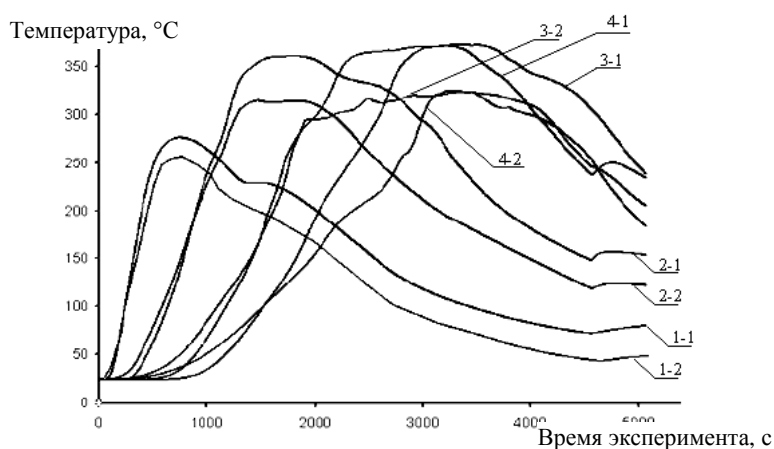
**Рис. 1. Схема макета для испытаний:**  
а – продольное сечение; б – поперечное сечение

Макет состоит из металлической обечайки (тонкостенного цилиндрического корпуса) 1, внутри которой в сечениях I, II, III, IV располагались тонкостенные трубки 1-1, 2-1, 3-1, 4-1, 1-2, 2-2, 3-2, 4-2 для установки термопар. Внутри корпуса засыпался зерненный регенеративный продукт (шихта) 2 на основе супероксида калия. Через макет в направлении, показанном стрелкой, продували газоздушную смесь с влажностью 93...98 % и объемной концентрацией CO<sub>2</sub> на входе в макет 4 ± 0,2 %.

Из экспериментальных данных видно (рис. 2), что в момент интенсивного протекания химической реакции в каждом из сечений макета температура практически не зависит от радиуса (на рис. 2 это выражается в наложении кривой 1-1 на 1-2, 2-1 на 2-2, 3-1 на 3-2).

Этот факт позволяет для периода интенсивного протекания химической реакции в сечении цилиндрического слоя с достаточной для расчетов точностью считать, что температура есть функция только времени и продольной координаты.

Для упрощения краевой задачи теплопереноса в цилиндрическом насыпном слое шихты допустим, что поток газа движется только вдоль продольной оси  $z$ , при этом перенос тепла вдоль оси  $z$  за счет теплопроводности пренебрежимо мал по сравнению с переносом тепла за счет конвективного движения газа. В связи с относительно малыми размерами частиц регенеративного продукта допустим, что температура проходящего газа равна температуре шихты.



**Рис. 2. Экспериментальные данные теплопереноса**

С учетом этих допущений, запишем краевую задачу теплопереноса в цилиндрическом слое шихты в виде

$$(c_3 \rho_3) \frac{\partial \bar{T}(z, \tau)}{\partial \tau} = -\frac{2\alpha}{R_0} [\bar{T}(z, \tau) - T_c] - wc^f \rho^f \frac{\partial \bar{T}(z, \tau)}{\partial z} + q_v(z, \tau),$$

$$z > 0, \tau > 0; \quad (4)$$

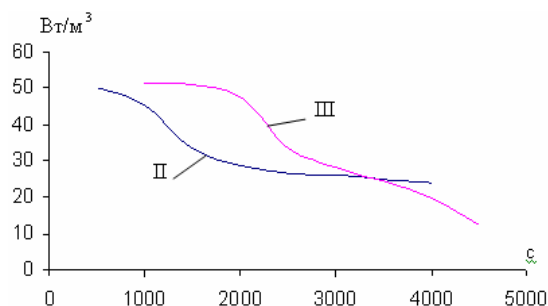
$$\bar{T}(z, 0) = \bar{T}_0; \quad (5)$$

$$\bar{T}(0, \tau) = \bar{T}_{\text{вх}}(\tau), \quad (6)$$

где  $\bar{T}(z, \tau)$  – среднеинтегральная по сечению макета температура, определяемая по формуле

$$\bar{T}(z, \tau) = \frac{\int_0^{R_0} T(r, z, \tau) r dr}{\int_0^{R_0} r dr} = \frac{2}{R_0^2} \int_0^{R_0} T(r, z, \tau) r dr, \quad (7)$$

$c_3 \rho_3, c^f \rho^f$  – эффективная объемная теплоемкость шихты и объемная теплоемкость газа, соответственно;  $\bar{T}_0$  – начальная температура;  $T_c$  – температура среды;  $\bar{T}_{\text{вх}}$  – температура во входном сечении шихты;  $R_0$  – радиус цилиндрического слоя шихты;  $\alpha$  – коэффициент теплообмена.



**Рис. 3. Графики зависимости  $q_v = f(z, \tau)$**

Воспользуемся уравнением (4) для вычисления объемной мощности внутренних источников теплоты  $q_v(z, \tau)$ . Для этого запишем уравнение (4) в виде

$$q_v(z, \tau) = (c_3 \rho_3) \frac{\partial \bar{T}(z, \tau)}{\partial \tau} + \frac{2\alpha}{R_0} [\bar{T}(z, \tau) - T_c] + wc^r \rho^r \frac{\partial \bar{T}(z, \tau)}{\partial z}. \quad (8)$$

Результаты расчетов мощности внутренних источников теплоты  $q_v(z, \tau)$  для сечений II ( $z = 0,063$ ), и III ( $z = 0,103$ ) макета приведены на рис. 3.

При известных значениях суммарного теплового эффекта химических реакций  $H_{\Sigma}$ , сопровождающих процесс регенерации воздуха, а также по полученным в эксперименте значениям  $q_v(z, \tau)$  можно по формуле (3) вычислить скорость поглощения реагента  $da/d\tau$ .

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Франк-Каменецкий, Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике / Д.А. Франк-Каменецкий. – М. : Наука, 1987. – 492 с.
2. Обоснование выбора формально-кинетического уравнения хемосорбции применительно к частице сферической формы / А.М. Кудрявцев, А.В. Кудрявцева, А.А. Кримштейн, С.В. Плотникова // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 1995. – № 1. – С. 59 – 65.
3. Математическое моделирование сорбционных процессов с обратными связями в системах, содержащих несколько аппаратов / А.В. Колбанцев, В.Л. Колин, А.А. Кримштейн, М.В. Герке; Академия наук СССР. – М., 1983. – 25 с. – Деп. в ВИНТИ, № 4228-83.
4. Динамика изотермической сорбции при резковыпуклой изотерме / Н.А. Жукова [и др.] ; Ленингр. технологический ин-т им. Ленсовета. – Л., 1976. – 14 с. – Деп. в ВИНТИ, № 500-76.
5. Моделирование работы изолирующих аппаратов на химически связанном кислороде / А.А. Кримштейн, С.В. Плотникова, В.И. Коновалов, Б.В. Путин // Журнал прикладной химии. – 1992. – Т. 65, № 11. – С. 2463 – 2469.
6. Математическое моделирование тепловых процессов в изолирующих дыхательных аппаратах на химически связанном кислороде / А.А. Кримштейн, С.В. Плотникова, В.И. Коновалов, Б.В. Путин // Журнал прикладной химии. – 1992. – Т. 65, № 11. – С. 2470 – 2473.

*Кафедра «Автоматизированные системы и приборы»*