

А. А. ОЙГЕНБЛИК, А. С. ЖЕЛЕЗНОВ,
член-корреспондент АН СССР М. Г. СЛИНЬКО

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОДОЛЬНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ И МЕЖФАЗНОГО ОБМЕНА В СВОБОДНО КИПЯЩЕМ СЛОЕ

Математическое моделирование каталитических реакторов со свободно кипящими слоями представляет значительные трудности. Одной из главных причин является недостаточная изученность гидродинамической обстановки. С целью уточнения модели движения газа в свободно кипящем слое применена экспериментальная методика, заключающаяся в одновременном измерении мгновенных концентраций газа-трассера и флуктуаций плотности твердых частиц в малом объеме слоя. Исследования выполнены

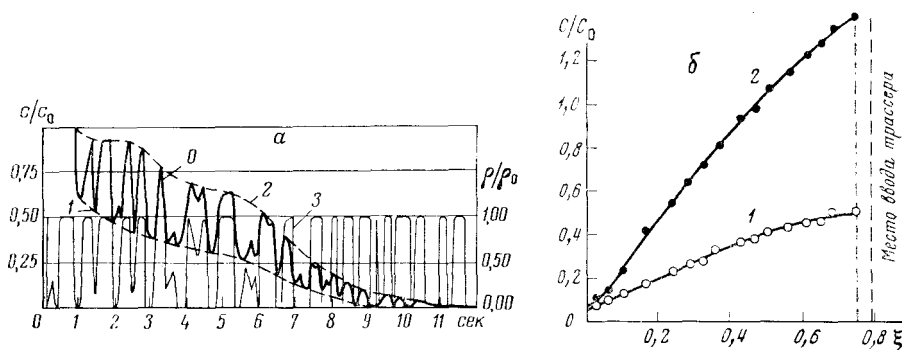


Рис. 1. Примеры экспериментальных кривых вымывания (а) и обратного перемешивания (б). 0 — локальная кривая вымывания, 1 — фаза пузырей, 2 — плотная фаза, 3 — кривая флуктуации плотности

на двумерном слое с геометрическими размерами $2,0 \times 60 \times 250$ см. Определялись локальные кривые вымывания при ступенчатом прекращении подачи трассера (Ne) на входе в слой и кривые обратного перемешивания при стационарном вводе трассера в верхнее сечение слоя. Примеры кривой вымывания и кривой флуктуации плотности приводятся на рис. 1а. В соответствии с мгновенными плотностями слоя мгновенные концентрации могут быть отнесены к одной из фаз. Это позволяет трактовать огибающие локальной кривой вымывания как кривые вымывания из фазы пузырей и непрерывной фазы. Аналогичным образом получены кривые обратного перемешивания в фазах (рис. 1б).

На расстоянии 10–20 см от газораспределительной решетки наблюдался режим псевдооживления, близкий к однородному, и мгновенные концентрации в фазах были практически неразличимы. Выше можно выделить зону развитого псевдооживления, где, судя по характеру локальных кривых вымывания, межфазный обмен ограничен. С помощью кинесъемки установлено, что в этой зоне почти весь газ проходит слой в виде пузырей.

Полученные данные приняты за основу модификации двухфазной модели, предложенной Ван-Димтером (¹), учитывая, что ее параметры переменны по высоте слоя.

Уравнения баланса по меченому веществу

$$(1-\varphi) \frac{\partial C_1}{\partial \theta} = -\frac{\partial C_1}{\partial \xi} + n_k(C_2 - C_1); \quad \varphi \frac{\partial C_2}{\partial \theta} = \frac{1}{\text{Re}} \frac{\partial^2 C_2}{\partial \xi^2} - n_k(C_2 - C_1), \quad (1)$$

где C_1 и C_2 — безразмерные концентрации трассера в фазах, $\theta = \tau/\bar{\tau}$ — безразмерное время, $\xi = H/H_p$ — безразмерная высота слоя, $n_k = \beta H_k/u$ — безразмерный коэффициент межфазного обмена, β — коэффициент межфазного обмена, отнесенный к единице объема контакта, φ — доля свободного объема слоя, приходящаяся на плотную фазу. Граничные условия зависят от способа подачи трассера в слой. Интегрируя (1) по θ в интервале $(0, \infty)$ с начальными условиями $\theta=0$; $C_1=C_2=1$ (вымывание), получим:

$$(1-\varphi) = \frac{dm_1^0}{d\xi} - n_k(m_2^0 - m_1^0); \quad \varphi = -\frac{1}{\text{Re}} \frac{d^2 m_2^0}{d\xi^2} + n_k(m_2^0 - m_1^0), \quad (2)$$

где m_1^0 и m_2^0 — нулевые моменты локальных кривых вымывания из фаз.

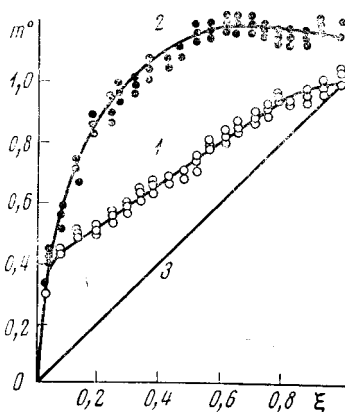


Рис. 2

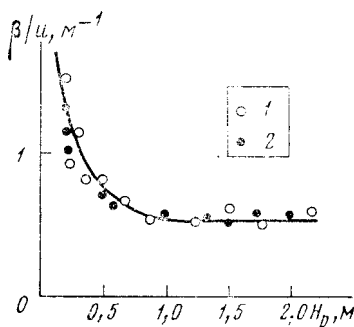


Рис. 3

Рис. 2. Зависимости нулевых моментов кривых вымывания из фаз от высоты слоя. 1 — фаза пузырей, 2 — плотная фаза, 3 — идеальное вытеснение

Рис. 3. Зависимости коэффициентов межфазного обмена от высоты слоя, $H_k=0,87-1,6$ м, $u=0,1-0,7$ м/сек; 1 — стационарный ввод трассера, 2 — нестационарный

Можно показать, что m_1^0 и m_2^0 эквивалентны концентрациям трассера, стационарно подаваемого в слой при равномерном распределении источников по всему свободному объему ⁽²⁾. Пример экспериментальной зависимости

$$m_1^0 = \int_0^\infty C_1(\xi, \tau) d\tau / \bar{\tau} C_0; \quad m_2^0 = \int_0^\infty C_2(\xi, \tau) d\tau / \bar{\tau} C_0$$

от высоты слоя приводится на рис. 2.

Параметры n_k и Re определялись из условия наилучшего соответствия интегральных кривых систем (1) и (2) экспериментальным. Оценки величин β , полученных на основе данных стационарных и нестационарных экспериментов в интервале рабочих скоростей газа $u=0,1-0,7$ м/сек при начальных высотах слоя $H_k=0,87-1,6$ м, представлены на рис. 3.

Близость величин β , полученных с помощью различных типов экспериментов, свидетельствует об адекватности принятой модели реальной картине движения газа. Интересно, что в исследованном интервале рабочих скоростей β/u постоянны, т. е. локальные величины коэффициентов межфазного обмена $\beta \sim u$. Величины $D_{\text{эф}}$ меняются по высоте слоя. Можно выделить зоны с повышенной интенсивностью перемешивания. Масштабы

циркуляционных контуров примерно соответствуют ширине аппарата. С ростом рабочей скорости безразмерный комплекс Re при одних и тех же H_p уменьшается, $D_{эф}^* \sim u^{0,5}$, где $D_{эф}$ — эффективный коэффициент продольного перемешивания газа. Таким образом, для свободных слоев, как для организованных ⁽³⁾, предпочтительны высокие рабочие скорости. В частности, представляется возможным сохранять времена контакта при масштабировании аппаратов с пилотных установок, увеличивая при этом, соответственно, u и H_p .

Исследования, выполненные на цилиндрических стендах и «горячих» опытных установках, показали, что ширина двумерного слоя и диаметр цилиндрического одинаковым образом влияют на межфазный обмен и продольное перемешивание. При этом коэффициенты межфазного обмена различаются на 10–20%. Следовательно, двумерные слои представляют интерес не только при методологических исследованиях, но и как пилотные установки, позволяющие при малой производительности уловить масштабные эффекты.

Авторы выражают признательность Ю. А. Бувичу за обсуждение настоящей работы.

Институт катализа
Сибирского отделения Академии наук СССР
Новосибирск

Поступило
26 II 1975

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

¹ I. I. van Deemter, Chem. Eng. Sci., v. 13, № 3, 143 (1961). ² М. М. Розенберг, Т. Г. Тройнова, Л. Н. Хейфец, Сб.: Моделирование химических процессов и реакторов, т. 4, Новосибирск, 1972, стр. 157. ³ М. Г. Слинько, В. С. Шепелев, Кинетика и катализ, т. 11, в. 2 (1970).