

УДК 541.183

ВЫБОР КОЛИЧЕСТВА АДсорБЕРОВ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ РАЗДЕЛЕНИЯ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ

В.Л. Зеленко, Л.И. Хейфен

(кафедра химической технологии и новых материалов; e-mail: heifets@tech.chem.msu.ru)

Для технологической схемы разделения газовых смесей на основании гипотезы эргодичности представлена процедура выбора общего количества адсорберов и количества активных адсорберов, т.е. находящихся в рассматриваемый момент в режиме адсорбции.

При проектировании адсорбционной схемы разделения важной задачей является выбор общего количества однотипных адсорберов n и их разбиение на активные n_a , т.е. находящиеся в рассматриваемый момент цикла в режиме адсорбции, и пассивные $n_p = n - n_a$, т.е. находящиеся в этот же момент цикла в режиме регенерации (стадии сброса, продувки и повышения давления). Обозначим долю активных адсорберов в системе разделения как α_a

$$\alpha_a = n_a / n. \quad (1)$$

Например, в большинстве коммерческих систем разделения воздуха используют два (один в режиме адсорбции и один в режиме регенерации, $\alpha_a = 0,5$) или три (два в режиме адсорбции и один в режиме регенерации, $\alpha_a = 0,66$) адсорбера. В схеме выделения водорода из продуктов конверсии метана, разработанной фирмой "UCC", используют 9 адсорберов [1].

Количество адсорберов n в схеме разделения обычно выбирают, исходя из экономической и практической целесообразности. При этом следует принимать во внимание, что увеличение количества адсорберов n в технологической схеме разделения ведет к снижению нагрузки на один адсорбер и как следствие к снижению потерь давления при фильтрации газа через слой адсорбента, но резко усложняет систему управления разделительной схемой. Кроме того, чем меньше в каждый момент цикла количество n_p адсорберов в режиме регенерации, тем экономичнее схема.

Одной из основных исходных посылок при проектировании адсорбционной схемы разделения является необходимость обеспечения величины и непрерывности продуктового потока Q моль/с. Обозначим продуктовый поток из одного активного адсорбера через q , моль/с. Тогда число активных адсорберов равно

$$n_a = Q / q. \quad (2)$$

При этом для величины удельного продуктового потока $j = q/S_0$, моль/(м²·с), где S_0 – поперечное сечение отдельного адсорбера (м²), существуют естественные ограничения сверху, обусловленные двумя факторами: потерей давления в слое и конвективной неустойчивостью фронта адсорбции. Потери давления при фильтрации газа через слой адсорбента данного сечения зависят от массового расхода газа и структуры слоя, что находит свое отражение во многих полуэмпирических формулах, предлагаемых для расчета гидравлического сопротивления слоя [2]. В свою очередь конвективная неустойчивость фронта адсорбции определяется величиной адсорбционного числа Архимеда [3, 4].

Результаты экспериментов, проведенных на лабораторном адсорбере или на стенде, можно представить в виде отношения продолжительности режима адсорбции к общей продолжительности цикла τ_0 (с)

$$\alpha_\tau = \frac{\tau_a}{\tau_c} = \frac{\tau_a}{\tau_a + \tau_d + \tau_0}. \quad (3)$$

Продолжительность режима адсорбции τ_a (с) равна времени прохождения фронта адсорбции с линейной скоростью w_f (м/с), через слой адсорбента длиной L (м) $\tau_a = L/w_f$. Продолжительность стадии сброса τ_d (с) по аналогии можно отождествить со временем прохождения "фронта" десорбции с линейной скоростью w_d (м/с) через слой длиной L , $\tau_d = L/w_d$. Продолжительность вспомогательных стадий режима регенерации (продувка, заполнение) обозначим как τ_0 (с). С учетом этого выражение (3) примет вид

$$\alpha_\tau = \frac{1}{\varphi(L)}, \quad (4)$$

где

$$\varphi(L) = 1 + \frac{w_f}{w_d} + \frac{w_f \cdot \tau_0}{L}. \quad (5)$$

Рассмотрим систему, состоящую из бесконечно большого числа адсорберов

$$(n \rightarrow \infty, n_a \rightarrow \infty, \frac{n_a}{n} \rightarrow \alpha_{a,\infty}),$$

как множество случайных объектов. Для такой системы из фундаментальной гипотезы эргодичности следует, что доля времени, проведенная случайно выбранным адсорбером в активной фазе α_τ , равна доле активных адсорберов среди множества всех адсорберов $\alpha_{a,\infty}$

$$\alpha_{a,\infty} = \alpha_\tau. \tag{6}$$

В реальной системе, представляющей некоторую конечную выборку, доля активных адсорберов α_a (1) есть отношение двух целых чисел, в то время как определенный из экспериментов параметр α_τ (3) есть произвольное число. Поэтому условие эргодичности (6) для реальной системы с конечным числом адсорберов следует рассматривать только как приближительное равенство

$$\alpha_a \approx \alpha_\tau. \tag{7}$$

Чтобы согласовать точное условие эргодичности (6) с приближительным равенством (7), введем параметр β таким образом, чтобы

$$\frac{1}{\beta} \cdot \alpha_a = \alpha_\tau. \tag{8}$$

Заметим, что выбор параметра β во многом зависит от интуиции и опыта исследователя. При доста-

точно большом количестве адсорберов n в схеме этот параметр должен быть порядка единицы. Из формул (1), (2), (4), (5) и (8) следует соотношение

$$n = \frac{Q}{\beta q} \cdot (1 + \frac{w_f}{w_d} + \frac{w_f \cdot \tau_0}{L}), \tag{9}$$

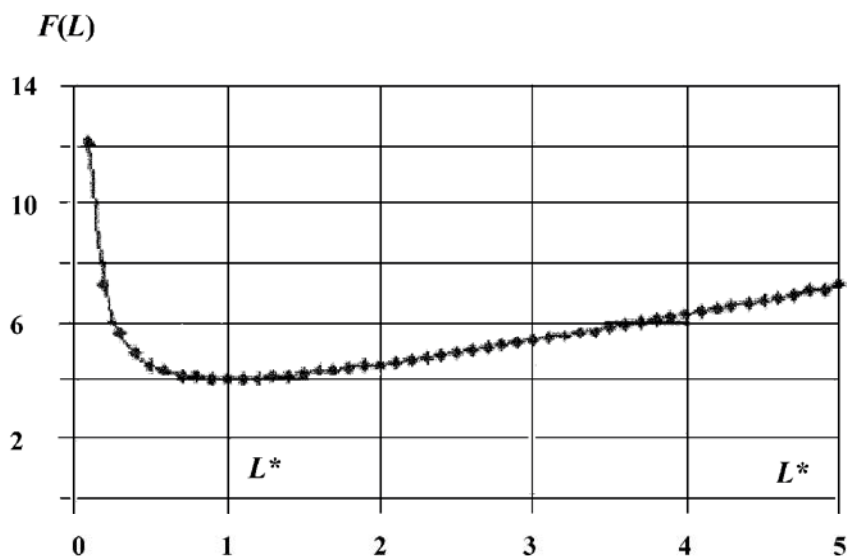
с помощью которого можно сделать определенные заключения об оптимальной системе разделения газовых смесей. Например, во многих практически важных случаях предметом оптимизации адсорбционной системы является минимизация ее массогабаритных характеристик. Рассмотрим целевую функцию, пропорциональную объему (массе) системы разделения, состоящей из n адсорберов:

$$F = L \cdot n \cdot s_0 + n V_0, \tag{10}$$

где V_0 – объем вспомогательных элементов системы, приходящийся на один адсорбер. Первое слагаемое в формуле (10) равно объему адсорбента в системе, а второе слагаемое равно объему технологической оснастки системы (в том числе клапаны, дроссели, внутрисистемные коммуникации). Для простоты анализа будем полагать, что объем вспомогательных элементов системы, приходящийся на один адсорбер, не зависит от длины адсорбера.

Подставив соотношение (9) в формулу (10), выразим целевую функцию через длину адсорбера $F(L)$

$$F(L) = \frac{Q s_0}{q \beta} \cdot \left(L + \frac{V_0}{s_0} \right) \cdot \left(1 + \frac{w_f}{w_d} + \frac{w_f \tau_0}{L} \right). \tag{11}$$



Схематичный график целевой функции $F(L)$ (11). Минимуму функции $F(L)$ соответствует значение L^* , рассчитанное по формуле (12)

Решая алгебраическое уравнение $\partial F/\partial L = 0$, получаем

$$L^* = \sqrt{\frac{V_0 w_f \tau_0}{s_0(1 + \frac{w_f}{w_d})}} \quad (12)$$

Величине L^* (12) соответствует минимум целевой функции $F(L)$ (11) (рисунок).

Воспользовавшись вычисленным значением L^* (12), можно оценить по формуле (9) общее количество адсорберов в схеме разделения при заданных значениях производительности Q и нагрузки на один активный адсорбер q .

В заключение отметим, что при распределении адсорберов по стадиям адсорбционного цикла необходимо стремиться к тому, чтобы наилучшим образом удовлетворить соотношению (8), являющемуся следствием фундаментального равенства (6). Проще всего этого можно добиться, увеличивая общее число n адсорберов в системе. Например, пусть в результате

лабораторного или стендового исследования получено значение $\alpha_\tau = 0,7$. Ограничения на потери напора при фильтрации заданного потока разделяемой газовой смеси приводят технолога к необходимости использовать систему из 4 активных адсорберов. Для устойчивой работы такой системы число адсорберов в режиме регенерации должно быть, по крайней мере, равно двум. В этом случае $\alpha_a = 0,66$, $\beta = 1,06$. Но если дальнейшие эксперименты покажут, что нагрузка на один активный адсорбер q все еще чрезмерна, то можно рассмотреть систему из 7 адсорберов, в том числе 5 активных адсорберов ($\alpha_a = 0,71$). В этом случае $\beta = 1,014$.

Вывод

На основе гипотезы эргодичности сформулирована процедура выбора количества адсорберов для схемы разделения газовых смесей. Предложена целевая функция для оптимизации процедуры выбора количества адсорберов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sircar S., Golden T.C., Rao M.B. // Carbon. 1996. **34**. P. 1.
2. White D.H.Jr., Barkley P.G. // Chem. Eng. Progr. 1989. **85**. P. 25.
3. Зеленко В.Л., Макеев Е.А., Хейфец Л.И. // Изв. РАН. МЖГ. 2006. № 3. С. 77.
4. Макеев Е.А., Зеленко В.Л., Хейфец Л.И. // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 2. Химия. 2006. **47**. С. 318.

Поступила в редакцию 26.04.07

OPTION OF THE ADSORBERS AMOUNT IN THE TECHNOLOGICAL GAS SEPARATION SYSTEM

V.L. Zelenko, L.I. Heifets

(Division of Chemical Technology and New Materials)

The algorithm for the total number of adsorbers and the number of active adsorbers, i.e. ones being in the adsorption mode during the concerned time, has been designed on the base of ergodic hypothesis. This algorithm is intended for process flowsheet development of the gas mixture separation.