

УДК 539.217.5: 66.077

ДИФФУЗИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В АБСОРБЦИОННОМ МОДУЛЕ МЕМБРАННОГО КОНТАКТОРА

И. Н. Бекман, Д. Г. Бессарабов, Р. Д. Сандерсон*

(кафедра радиохимии)

Предложена математическая модель селективной диффузии бicomпонентной смеси газов в абсорбционном модуле мембранного контактора с непористой мембраной и подвижным жидким носителем. Основное внимание уделено оценке эффективности очистки ретентата от сопутствующей примеси в режимах одинаково и противоположно направленного течения жидкости и газа при предположении механизма поршневого течения в обеих фазах. Рассмотрено влияние на производительность и селективность абсорбционного модуля таких параметров, как направление взаимного течения жидкости и газа, скоростей движения жидкого носителя и газа, величин констант растворимости и коэффициентов диффузии газов в материале полимерной мембраны, констант растворимости газов в жидком носителе и др. Продемонстрированы некоторые преимущества режима противотока по сравнению с режимом сотока.

В настоящее время мембранные интегрированные системы (МИС) все шире применяются для разделения газообразных и жидких веществ [1–3]. В мембранном абсорбере с подвижным жидким носителем (частный случай МИС) для управления процессом селективного массопереноса используют сочетание методов мембранной технологии с методами жидкостной абсорбции. Совмещение в одном устройстве нескольких различных способов сепарации позволяет сохранить такие известные преимущества мембранной технологии, как компактность и гибкость, дополнив их высокой селективностью, характерной для абсорбционного метода. В настоящее время эффективность мембранных контакторов с подвижным жидким носителем продемонстрирована на примерах разделения биогаза, воздуха, выделения углекислого газа, отделения олефинов от парафинов и других смесей флюидов [4–7].

При разработке и оптимизации режимов эксплуатации мембранных контакторов существенное внимание уделяется развитию математического описания селективной диффузии в подобных аппаратах [8–10]. Однако многие важные аспекты теории массопереноса в системах с подвижным носителем до сих пор не разработаны.

В настоящей работе предложено феноменологическое описание диффузии в абсорбционном модуле мембранного контактора, использующего мембраны со сплошным (непористым) рабочим слоем и подвижный жидкий носитель. Основное внимание уделено сравнению эффективности двух режимов газоразделения: с сонаправленным или с противоположно направленным течением газа и жидкости.

Мембранный пермабсорбер (МПА) предназначен для разделения смеси двух газов и состоит из двух ячеек (абсорбционной и десорбционной), между которыми циркулирует жидкий абсорбент. Исходная смесь газов проходит над полимерной мембраной в абсорбционном модуле. Наиболее лег-

ко проникаемый компонент газовой смеси (пенетрант) селективно диффундирует через полимерную мембрану в движущуюся под ней жидкость, поглощается этой жидкостью и уносится ею в десорбционный модуль. Дегазация в жидкости происходит в десорбционном мембранном модуле через вторую полимерную мембрану. Из десорбера выходит в основном высокопроницаемый компонент газовой смеси (десорбат). Низкопроницаемый компонент газовой смеси удаляется из абсорбционного модуля (ретентат).

В данной работе мы ограничимся анализом процесса селективной диффузии газов только в первом (абсорбционном) модуле (АМ) пермабсорбера. В качестве рабочего элемента используем асимметричную полимерную мембрану тонким сплошным (непористым) рабочим слоем. Рассмотрим разделение двухкомпонентной газовой смеси, обедненной по целевому газу, абсорбционным модулем с одной полимерной мембраной. Растворение газов в полимере и жидкости подчиняется закону Генри, а диффузия газов по мембране – законам Фика. Диффундирующие флюиды ни друг с другом, ни с рабочими элементами АМ ни в какие химические реакции не вступают. Будем полагать, что и в газовой камере и жидкости имеет место идеальное перемешивание по координатам x и z и отсутствие какого-либо перемешивания (поршневое течение) по координате y . Распределение линейных скоростей течения жидкости по толщине слоя однородно. Жидкость не растворима в полимере, не пластифицирует его и никак не влияет на процессы растворения и диффузии газов в полимере. Никаких процессов выделения или поглощения тепла в системе не происходит.

Одинаковые направления движения жидкости и газа

Рассмотрим ситуацию, при которой исходная газовая смесь и жидкость движутся в одном направлении (соток). Мембранный абсорбер функционирует в проточном

* Стелленбошский университет, ЮАР, химический факультет.

режиме, т.е. на вход абсорбционного модуля непрерывно подается свежая жидкость.

Введем обозначения:

p_0 – парциальное давление пенетранта на входе в абсорбер; C_g – концентрация пенетранта в газовой камере; C_m – концентрация пенетранта в мембране; C_l – концентрация пенетранта в жидкости; D – коэффициент диффузии пенетранта в материале мембраны; σ_g – растворимость пенетранта в газовой фазе; σ_m – растворимость пенетранта в материале мембраны; σ_l – растворимость пенетранта в жидкости.

$$K_{gm} = \frac{C_m}{C_g} = \frac{\sigma_m}{\sigma_g} - \text{коэффициент распределения пенетранта между первым флюидом и полимером,}$$

$$C_m = \frac{C_g \sigma_m}{\sigma_g} = K_{gm} C_g.$$

Замечание 1. Если «газовая» фаза (первый флюид, в котором растворен газ) – жидкость (как это имеет место в мембранном экстракторе), то коэффициент $K_{gm} \neq 1$, если же «газовая» фаза – газ (как это имеет место в мембранном абсорбере), то

$$K_{gm} = 1 \text{ и } \sigma_m = \sigma_g.$$

$$K_{m\ell} = \frac{C_\ell}{C_m} = \frac{\sigma_\ell}{\sigma_m} - \text{коэффициент распределения пенетранта между мембраной и жидкостью (вторым флюидом),}$$

$$C_\ell = \frac{C_m \sigma_\ell}{\sigma_m} = K_{m\ell} C_m = \frac{C_g \sigma_m \sigma_\ell}{\sigma_g \sigma_m} =$$

$$= K_{gm} K_{m\ell} C_g = K_{g\ell} C_g, \text{ где } K_{g\ell} = \frac{\sigma_\ell}{\sigma_g}.$$

$$\text{Отсюда } C_\ell = \frac{C_g \sigma_\ell}{\sigma_g}; C_g = C_\ell \frac{\sigma_g}{\sigma_\ell},$$

т.е. если система в равновесии (ни газ, ни жидкость не перемещаются), то количество пенетранта, перешедшее через мембрану в жидкость, не зависит от термодинамических свойств материала мембраны. Однако в случае «растворения» газа в газе:

$$C_g = C_\ell \frac{\sigma_m}{\sigma_\ell}.$$

Воспользуемся безразмерными растворимостями (растворимостями, нормированными на растворимость газа в газе):

$$\bar{\sigma}_m = \frac{\sigma_m}{\sigma_g}; \quad \bar{\sigma}_\ell = \frac{\sigma_\ell}{\sigma_g}.$$

(Для простоты крышку в формулах далее ставить не будем.) $P = D\sigma_m$ – константа проницаемости пенетранта через мембрану; $Z = P^A/P^B = J_0^A/J_0^B$ – селективность полимера; $J_0 = PSp_0/l$ – стационарный поток газа через мембрану в отсутствие жидкости; $K_D = D^A/D^B$ – кинетический параметр полимера; $K_{Sm} = \sigma_m^A/\sigma_m^B$ – термодинамический параметр полимера; $K_{Sl} = \sigma_l^A/\sigma_l^B$ – термодинамический параметр жидкости; $K_{ml} = \sigma_m/\sigma_l$ – коэффициент экстракции; l_g – толщина газового слоя; l_m – толщина мембраны; l_l – толщина слоя жидкости; $h_g = h_m = h_l = h$ – длина модуля (и, следовательно, мембраны); $d_g = d_m = d_l = d$ – ширина модуля (и мембраны); $S = dh$ – площадь поверхности мембраны; $V_g = dhl_g$ – объем газовой камеры; $V_m = dhl_m$ – объем мембраны; $V_l = dhl_l$ – объем жидкости; ϑ_g – линейная скорость движения газа, см/с; W_g – объемная скорость движения газа, см³/с, $W = \vartheta l$; ϑ_l – линейная скорость движения жидкости; W_l – объемная скорость движения жидкости; y – координата вдоль мембраны; $C(y)$ – концентрационный профиль пенетранта вдоль мембраны; $J(y)$ – локальный поток газа в мембрану; J – полный поток газа в мембрану.

Надстрочные индексы: A – целевой компонент; B – второй компонент разделяемой газовой смеси.

Подстрочные индексы: g – газ; m – мембрана (полимер); l – жидкость.

Система дифференциальных уравнений, описывающая диффузию в мембранном абсорбере, имеет вид:

для газовой фазы

$$W_g h \frac{dC_g}{dy} = - \frac{DS}{l_m \sigma_\ell} (C_{g\ell} - C_{\ell m}), \quad (1a)$$

для жидкой фазы

$$W_\ell h \frac{dC_\ell}{dy} = \frac{DS}{l_m \sigma_\ell} (C_{g\ell} - C_{\ell m}). \quad (1b)$$

Граничные условия для абсорбционного модуля в проточном режиме:

$$C_g \Big|_{y=0} = C_0; C_\ell \Big|_{y=0} = 0. \quad (2)$$

Перепишем систему (1):

$$W_g h \frac{dC_g}{dy} = - \frac{DS}{l_m \sigma_\ell} (C_g \sigma_\ell - C_l \sigma_m) = - \frac{DSC_g}{l_m} + \frac{DS\sigma_m C_l}{l_m \sigma_\ell},$$

$$W_l h \frac{dC_\ell}{dy} = \frac{DS}{l_m \sigma_\ell} (C_g \sigma_\ell - C_l \sigma_m) = \frac{DSC_g}{l_m} - \frac{DS\sigma_m C_l}{l_m \sigma_\ell}.$$

Введем обозначения: $A = W_g h$; $B = DS/l_m$; $E = DS\sigma_s/l_m\sigma_s$; $F = W_l h$. Тогда

$$\begin{aligned} A \frac{dC_g}{dy} &= -BC_g + EC_l \\ F \frac{dC_g}{dy} &= BC_g - EC_l \end{aligned} \rightarrow \begin{aligned} AC_g + FC_l &= Const = N_0 \\ \frac{dC_g}{dy} + F \frac{dC_l}{dy} &= 0 \end{aligned}$$

Из граничных условий: $y = 0, C_l = 0, C_g = C_0, AC_0 = N_0, C_l = (N_0 - AC_0)/F$

$$\frac{dC_g}{dy} = -\frac{B}{A}C_g + \frac{E}{A}C_l = -\frac{B}{A}C_g + \frac{EN_0}{AF} - \frac{E}{F}C_g, \tag{3a}$$

$$\frac{dC_g}{dy} + \left(\frac{B}{A} + \frac{E}{F}\right)C_g = \frac{E}{AF}N_0. \tag{36}$$

Распределение концентрации пенетранта в газовой фазе:

$$C_g = C_0 \left(\frac{EA}{BF + AE} + \frac{BF}{BF + AE} e^{-\left(\frac{B+E}{A}\right)y} \right),$$

$$a = \frac{W_g \sigma_l}{W_l \sigma_l + W_g \sigma_m}; \quad b = \frac{DS}{l_m h} \cdot \frac{W_l \sigma_l + W_g \sigma_m}{W_g W_l \sigma_l} = \frac{l_m h W_l}{a}, \tag{4}$$

где $a = \frac{W_g \sigma_l}{W_l \sigma_l + W_g \sigma_m}; \quad b = \frac{DS}{l_m h} \cdot \frac{W_l \sigma_l + W_g \sigma_m}{W_g W_l \sigma_l} = \frac{l_m h W_l}{a},$

$$K_\sigma = \frac{\sigma_m}{\sigma_l}; \quad K_w = \frac{W_l}{W_g}.$$

Распределение пенетранта по жидкой фазе:

$$\begin{aligned} C_l &= C_0 \frac{AB}{BF + AE} \left(1 - e^{-\left(\frac{B+E}{A}\right)y} \right), \\ C_l &= C_0 a (1 - e^{-by}). \end{aligned} \tag{5}$$

Локальный стационарный поток пенетранта через мембрану:

$$j(y) = D \frac{C_g - \frac{\sigma_m}{\sigma_l} C_l}{l_m} = \frac{DC_0}{l_m} \cdot e^{-\frac{DS}{l_m h} \frac{W_l \sigma_l + W_g \sigma_m}{W_g W_l \sigma_l} y} = J_0 e^{-by}, \tag{6}$$

где $J_0 = \frac{DC_0}{l_m} = \frac{D\sigma_m P}{l_m}$

(p – давление пенетранта на входе в абсорбер).

При $y = 0, j = j_0$.

Если $W_g = W_l = W$,

то $j(y) = \frac{DC_0}{l_m} \cdot e^{-\frac{DS}{l_m} \frac{\sigma_l + \sigma_m}{W\sigma_l} y}.$

Полный поток пенетранта, поступающий в жидкий носитель за время его прохождения через абсорбционную ячейку:

$$\begin{aligned} J &= d \int_0^h j(y) dy = C_0 \frac{W_g W_l \sigma_l}{W_l \sigma_l + W_g \sigma_m} \left(1 - e^{-\frac{DS}{l_m} \frac{W_l \sigma_l + W_g \sigma_m}{W_g W_l \sigma_l}} \right) = \\ &= C_0 U (1 - e^{-bh}), \end{aligned} \tag{7}$$

где $U = W_l a, C_0 = \sigma_m p$.

Пределы: $J \xrightarrow{W_l \rightarrow 0} 0; \quad J \xrightarrow{W_l \rightarrow \infty} \frac{PSP}{l_m} = J_0.$

Потоки газов А и В оказываются сложными функциями от скоростей движения жидкости и газа. Еще более сложной функцией является фактор селективности:

$$Z(W_l, W_g) = \frac{J^A}{J^B}. \tag{8}$$

Анализ полученных выражений показывает, что, изменяя W_l и W_g , мы можем изменить величину потока пенетранта от нуля до J_0 , т.е. до проницаемости полимерной мембраны. Если абсорбционная жидкость способна поглощать значительные количества пенетранта, то полимерная мембрана ухудшает ее возможности. Производительность мембранного абсорбера ограничена производительностью мембраны.

Ситуация с фактором селективности существенно сложнее. Даже если жидкость абсолютно неселективна и поэтому не может быть использована в традиционном жидкостном абсорбере, в мембранном абсорбере ее применение вполне допустимо: селективность полимера всегда удается реализовать. Это обстоятельство существенно расширяет диапазон жидкостей, вовлекаемых в процесс газоразделения. Эффективны жидкости, хорошо, но не селективно сорбирующие газы, например перфтораны («голубая кровь»). Если полимер неселективен (например, при использовании пористой мембраны), то устройство реализует селективность жидкости.

Интересными являются ситуации, когда и полимер и мембрана неселективны по отношению к разделяемой смеси. Здесь возможны два варианта: $P^A = P^B$, но $D^A \neq D^B$ и $s_m^A \neq s_m^B$, тогда при использовании неселективной жидкости газы все же будут делиться с фактором селективности равным отношению констант растворимости газов в полимере. Например, если $P^A = P^B = 10, D^A = 1, D^B = 10, s_s^A = 10, s_s^B = 1$, то смесь будет делиться такой неселективной мембраной и неселективной жидкостью с хорошим фактором разделения $Z = 10$. Если $P^A = P^B, D^A = D^B$ и $s_s^A = s_s^B$, то при использовании неселективной жидкости никакого газоразделения не будет ($Z = 1$). Однако изменяя скорость движения флюидов можно в широком диапазоне изменять величины потоков газов.

Таким образом, полимерная мембрана способна компенсировать недостатки жидкости, а жидкость – недостатки

мембраны. Они вскрывают и делают возможными использование скрытых друг в друге достоинств. Совместное применение полимерной мембраны и подвижного слоя жидкости значительно расширяет динамический диапазон изменения фактора разделения при смене скоростей флюидов: от термодинамического фактора разделения полимера до термодинамического фактора разделения жидкости.

Замечание 2. Сказанное относится к мембране со сплошным рабочим слоем. В пористых мембранах нет растворимости и, следовательно, нет термодинамической составляющей селективности. В этом фундаментальная причина низкой селективности пористых мембран. Потенциальные возможности непористых мембран гораздо шире, чем пористых.

Взаимопротивоположные направления движения жидкости и газа

Поменяем местами вход и выход в газовой камере абсорбционного модуля. Исходная газовая смесь вводится теперь со стороны выхода жидкости. Координата y направлена по направлению движения жидкости, газ движется в противоположном направлении (т.е. от $y = h$ до $y = 0$).

Система дифференциальных уравнений, описывающих массоперенос пенетранта в условиях протivotока, имеет вид

$$W_g h \frac{dC_g}{dy} = \frac{DS}{l_m \sigma_l} (C_g \sigma_l - C_l \sigma_m),$$

$$W_l h \frac{dC_l}{dy} = \frac{DS}{l_m \sigma_l} (C_g \sigma_l - C_l \sigma_m). \tag{9}$$

Верхнее уравнение записано для концентрации пенетранта в газовой фазе, а нижнее – в жидкой фазе.

В проточном режиме граничные условия имеют вид:

$$C_g|_{y=h} = C_0; C_l|_{y=h} = 0. \tag{10}$$

Введем обозначения:

$$A = W_g h; B = \frac{DS}{h}; E = \frac{DS \sigma_m}{h \sigma_l}; F = W_l h.$$

Тогда система уравнений приобретает вид:

$$A \frac{dC_g}{dy} = BC_g - EC_l,$$

$$F \frac{dC_l}{dy} = BC_g - EC_l. \tag{11}$$

В общем виде решения удобно представить в форме:

$$C_g(y) = K_g \exp\left(-\left(\frac{E}{F} - \frac{B}{A}\right)y\right) + \frac{\Delta N_0 E}{AE - FB},$$

$$C_l(y) = K_l \exp\left(-\left(\frac{E}{F} - \frac{B}{A}\right)y\right) + \frac{B \Delta N_0}{AE - FB}.$$

Константы K_g , K_l и ΔN_0 найдем из краевых условий.

$$K_g = \frac{FBC_0}{FB \exp\left(-\left(\frac{E}{F} - \frac{B}{A}\right)y\right) - AE},$$

$$K_l = \frac{ABC_0}{FB \exp\left(-\left(\frac{E}{F} - \frac{B}{A}\right)y\right) - AE},$$

$$\Delta N_0 = \frac{(FB - AE)AC_0}{FB \exp\left(-\left(\frac{E}{F} - \frac{B}{A}\right)y\right) - AE}.$$

Распределение концентрации пенетранта по мембранному модулю в газовой фазе:

$$C_g(y) = C_0 \frac{AE - FB e^{-\left(\frac{E}{F} - \frac{B}{A}\right)y}}{AE - FB e^{-\left(\frac{E}{F} - \frac{B}{A}\right)h}}$$

или

$$C_g(y) = C_0 \frac{W_g \sigma_m - W_l \sigma_l e^{-\left[\frac{DS(\sigma_m W_g - \sigma_l W_l)}{l_m W_g W_l \sigma_l}\right]y}}{W_g \sigma_m - W_l \sigma_l e^{-\left[\frac{DS(\sigma_m W_g - \sigma_l W_l)}{l_m W_g W_l \sigma_l}\right]h}}. \tag{12}$$

Распределение концентрации газа в жидкой фазе:

$$C_l(y) = C_0 AB \frac{1 - e^{-\left(\frac{E}{F} - \frac{B}{A}\right)y}}{AE - FB e^{-\left(\frac{E}{F} - \frac{B}{A}\right)h}}$$

или

$$C_l(y) = C_0 \frac{\sigma_l W_g \left(1 - e^{-\left[\frac{DS(\sigma_m W_g - \sigma_l W_l)}{l_m h W_g W_l \sigma_l}\right]y}\right)}{W_g \sigma_m - \sigma_l W_l e^{-\left[\frac{DS(\sigma_m W_g - \sigma_l W_l)}{l_m W_g W_l \sigma_l}\right]h}}. \tag{13}$$

Локальный стационарный поток пенетранта через мембрану:

$$j(y) = D \frac{C_g - \frac{\sigma_m}{\sigma_l} C_l}{l_m} = \frac{DC_0}{l_m} \left(\frac{\left(\sigma_m W_g - \sigma_l W_l\right) e^{-\left[\frac{DS(\sigma_m W_g - \sigma_l W_l)}{l_m W_g W_l \sigma_l}\right]y}}{W_g \sigma_m - \sigma_l W_l e^{-\left[\frac{DS(\sigma_m W_g - \sigma_l W_l)}{l_m W_g W_l \sigma_l}\right]h}} \right). \tag{14}$$

Следствия

При $W_g = W_l = W$:

$$j(y) = \frac{DC_0}{l_m} \cdot \frac{(\sigma_m - \sigma_l) e^{-\frac{DS(\sigma_m - \sigma_l)}{hl_m W \sigma_l} y}}{\sigma_m - \sigma_l e^{-\frac{DS(\sigma_m - \sigma_l)}{l_m W \sigma_l} y}}$$

Для $W \rightarrow 0$, $j(y) \rightarrow 0$, если $W \rightarrow \infty$, $j(y) \rightarrow j_0$. При $\sigma_l = \sigma_m$, $j(y) = j_0$ (не зависит от y и равен предельно возможному).

Замечание 3. Как уже упоминалось, поток газа в режиме сотока

$$j(y) = \frac{DC_0}{l_m} \cdot e^{-\frac{DS}{l_m h} \frac{y}{W_l}}$$

т.е. существенно ниже, чем в противотоке. В этом состоит одно из преимуществ режима противотока по сравнению с режимом сотока.

Полный поток пенетранта, поступающий в жидкий носитель за время прохождения абсорбционного модуля:

$$J = d \int_0^h j(y) dy = C_0 \left(\frac{W_g W_l \sigma_l \left(1 - e^{-\frac{DS(\sigma_m W_g - \sigma_l W_l)}{l_m W_l W_g \sigma_l}} \right)}{W_g \sigma_m - W_l \sigma_l e^{-\frac{DS(\sigma_m W_g - \sigma_l W_l)}{l_m W_l W_g \sigma_l}}} \right) \quad (15)$$

где $C_0 = \sigma_m p$.

Пределы: при $W_l \rightarrow 0$, $J \rightarrow 0$, при $W_l \rightarrow \infty$, $J = J_0$.

Замечание 4. Решения диффузионных уравнений для противотока характеризуются сильной неустойчивостью. Поэтому при расчетах следует прибегать к специальным методам регуляризации.

Несмотря на очевидные ограничения исходной модели, она отражает основные особенности процессов переноса в абсорбционном модуле с подвижным жидким носителем и характер влияния на него смены взаимного направления движения потоков газа и жидкости. Сравнение режимов сотока и противотока показывает, что в противотоке намного шире набор типов изменения выходных параметров моделирования (потока, селективности) от скоростей движения газа и жидкости: возможно появление минимумов и максимумов. Если в сотоке концентрационный профиль – всегда ниспадающая функция, то в противотоке концентрационный профиль, как правило, выпуклый относительно оси координат, хотя и возможен набор скоростей, при которых профиль концентрации газа в потоке вогнут, как в сотоке. Диапазон изменений потока и селективности в режиме противотока такой же, как и в режиме сотока. Как термодинамические, так и кинетические пределы, задаваемые соответствующими комплексами параметров мембраны и жидкости, в сотоке и противотоке аналогичны. Противоток гораздо активнее изменяет концентрации газов в пермеате, чем соток. Степень очистки хорошо растворимого, но медленно мигрирующего в полимере компонента А от В в режиме противотока во много раз выше, чем в сотоке. Потоки обоих компонентов в жидкость и их концентрации на выходе из абсорбционного модуля в противотоке существенно выше, чем в сотоке. Однако степень очистки быстро диффундирующего, но плохо растворимого газа В от А на выходе жидкости в режиме противотока очень плохая. Поэтому, если задача состоит в том, чтобы очистить пермеат от «быстрой» примеси, то следует выбирать режим противотока, а если нужно подать на десорбер уже хорошо разделенную смесь, то работать предпочтительнее в режиме сотока. В последнем случае при оптимальном подборе скоростей движения флюидов, десорберу делить уже ничего не надо: его задача лишь как можно полнее извлечь из жидкости компонент В.

В целом, интегрирование в одной системе методов мембранной технологии и абсорбции, использование подвижного носителя и сплошной мембраны (т.е. вовлечение в процесс селективного массопереноса как диффузионной, так и термодинамической составляющих селективности), целенаправленного подбора пары рабочих элементов (полимер/жидкость) и различных режимов относительного движения жидкости и газа позволяет вовлечь в переработку газовых смесей широкий набор как мембранных материалов, так и экстрагирующих жидкостей и обеспечить эффективное разделение веществ, образующих трудно разделяемые смеси (смеси изотопов, стереоизомеров и т.п.). С этим связаны хорошие перспективы развития интегрированных мембранных систем и, в частности, мембранных контакторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Shelekhin A.B., Beckman I.N. // J. Membr. Sci. 1992. **73**. P. 73.
2. Meulen B. // Membrane processes in separation (Eds. J.G.Crespo, K.W.Boddeker), NATO ASI Series, **E72**. 1994. P. 343.
3. Beckman I.N. // Polymeric gas separation membranes (D.R.Paul, Y.P.Yampolskii). Boca Raton. 1994. P. 301.
4. Шелехин А.Б., Теляков В.В., Бекман И.Н. // ТОХТ. 1992. **26**. С. 570.
5. Beckman I.N., Bessarabov D.G., Teplyakov V.V. // Ing. Eng. Chem. Res. 1993. **32**. P. 2017.
6. Bessarabov D.G., Sanderson R.D., Jacobs E.P., Beckman I.N. // J. Membr. Sci. 1996. **113**. P. 275.
7. Bessarabov D.G., Sanderson R.D., Jacobs E.P., Wind C.N., Gladkov V.S. // South African J. Chem. Eng. 1994. **6**. P. 26.
8. Teplyakov V., Sostina E., Beckman I., Netrusov A. // Word Journal of Microbiology and Biotechnology, 1996. **12**. P. 477.
9. Бессарабов Д.Г., Бекман И.Н. // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 2. Химия. 1993. **34**. С. 194.
10. Бессарабов Д.Г., Бекман И.Н. // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 2. Химия. 1993. **34**. С. 604.