

УДК 539.217.5: 66.077

РАЗДЕЛЕНИЕ ГАЗОВОЙ СМЕСИ В АБСОРБЦИОННОМ МОДУЛЕ МЕМБРАННОГО КОНТАКТОРА

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

(кафедра радиохимии)

В работе рассмотрены процессы диффузии газов в абсорбционном модуле мембранного контактора, содержащего плоскую непористую полимерную мембрану и движущийся жидкий носитель. Обсуждены особенности работы мембранного пермаабсорбера с функциональными материалами (мембраной и жидким абсорбентом) неспецифическими с точки зрения разделения бинарной смеси газов. Проведено компьютерное моделирование процессов разделения в абсорбционном модуле мембранного контактора проточного типа. Математическое моделирование включало использование таких переменных, как коэффициенты диффузии газов в полимере, константы растворимости газов в полимере и жидкости, объемные скорости движения исходной газовой смеси и жидкости. Рассчитаны зависимости от скоростей движения газовой смеси и жидкости таких параметров, как концентрационные профили обоих газов вдоль мембранного абсорбера, распределение локального фактора разделения вдоль мембраны, концентрация целевого продукта и фактор разделения на выходе из газовой камеры абсорбционного модуля. Установлено, что предложенная модель может быть эффективно использована для моделирования процесса газоразделения в мембранных контакторах лабораторного типа. Показано, что взаимопротивоположное течение газов и жидкости (противоток) более предпочтительно по сравнению с одинаковым направлением течения (соток). Путем варьирования скорости течения жидкого абсорбента и/или газа можно добиться компромисса между производительностью системы, чистотой конечного продукта и стабильностью процесса газоразделения.

В настоящей работе методами математического моделирования изучены процессы селективной диффузии газов в абсорбционном модуле (АМ) мембранного контактора, использующего в качестве рабочих элементов непористую полимерную мембрану и подвижный жидкий абсорбент. На примере неселективной мембраны и неселективной жидкости рассмотрено влияние скоростей движения газовой смеси и жидкости на форму концентрационного профиля целевого газа вдоль абсорбционного модуля, на распределение локального фактора селективности по поверхности мембраны, а также на производительность и селективность абсорбционного модуля мембранного пермаабсорбера. Основное внимание уделено проблеме оптимизации процесса очистки ретентата в двух режимах: одинаковое направление движения газа и жидкости (соток) и противоположно направленное движение флюидов (противоток).

Мембранный пермаабсорбер, предназначенный для разделения смеси двух газов, состоит из двух модулей (абсорбционного и десорбционного), между которыми циркулирует жидкий носитель (абсорбент). Исходная смесь газов проходит над непористой (сплошной) полимерной мембраной в абсорбционном модуле. Лучшее всего проникающий компонент газовой смеси селективно диффундирует через полимерную мембрану в движущуюся под ней жидкость, поглощается этой жид-

костью и уносится ею в десорбционный модуль. Дегазация жидкости проходит в десорбционной мембранной ячейке через вторую полимерную мембрану. Из десорбера выходит в основном высокопроницаемый компонент газовой смеси (десорбат). Плохо проникающий компонент газовой смеси удаляется из абсорбционной ячейки (ретентат).

В данной работе мы ограничимся анализом процесса селективной диффузии газов только в первом (абсорбционном) модуле МПА. В качестве рабочего элемента используем непористую полимерную мембрану. Будем полагать, что и в газовой камере, и в жидкости имеет место идеальное перемешивание по координатам x и z , а по координате y какое-либо перемешивание (поршневое течение) отсутствует. Координата y направлена вдоль АМ (по направлению течения жидкости, но не исходной газовой смеси). Распределение линейных скоростей течения жидкости по толщине слоя однородно.

Сначала рассмотрим ситуацию, при которой исходная газовая смесь и жидкость движутся в одном направлении (соток). Мембранный абсорбер функционирует в проточном режиме, т.е. на вход абсорбционного модуля непрерывно подается свежая жидкость.

Введем обозначения: p_0 – парциальное давление газа на входе в абсорбер; C – концентрация газа; D – коэффициент диффузии газа в материале мембраны; s –

*Стелленбошский университет, ЮАР, химический факультет.

растворимость газа (здесь используется безразмерная растворимость, т.е. растворимость газа в полимере или жидкости нормирована на «растворимость газа в газе»). $P = DS_m$ – константа проницаемости газа сквозь мембрану; l – толщина слоя; h – длина мембраны (равна длине АМ); S – площадь поверхности мембраны; W – объемная скорость движения флюида, см³/с. Надстрочные индексы: А – целевой компонент разделяемой газовой смеси; В – второй компонент. Подстрочные индексы: g – газ; m – мембрана (полимер), l – жидкость.

Распределение концентрации одного из компонентов разделяемой смеси в газовой камере вдоль абсорбционного модуля в режиме сотока описывается формулой:

$$C_{c,g}(y) = C_0 \frac{W_g \sigma_l}{W_l \sigma_l + W_g \sigma_m} \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_l} + \frac{W_l}{W_g} e^{-\frac{DS}{lm \cdot h} \frac{W_l \sigma_l + W_g \sigma_m}{W_g W_l \sigma_l} y} \right).$$

Концентрация газа на выходе из мембранного абсорбера в режиме сотока (в точке $y = h$) зависит от скоростей движения флюидов (W_g и W_l):

$$C_{c,h}(W_g, W_l) = C_0 \frac{W_g \sigma_l}{W_l \sigma_l + W_g \sigma_m} \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_l} + \frac{W_l}{W_g} e^{-\frac{DS}{lm \cdot h} \frac{W_l \sigma_l + W_g \sigma_m}{W_g W_l \sigma_l}} \right).$$

Здесь C_0 – концентрация газа на входе в АМ (в точке $y = 0$).

Введем понятие локального коэффициента разделения компонентов А и В разделяемой смеси:

$$U_c^{A/B}(y; W_l, W_g) = \frac{C_{c,g}^A(y; W_l, W_g)}{C_{c,g}^B(y; W_l, W_g)},$$

где $C_g^A(y)$ и $C_g^B(y)$ – распределения концентрации газов А и В вдоль мембраны в газовой камере абсорбционного модуля.

Коэффициент разделения на выходе из мембранного абсорбера (в точке $y = h$) в режиме сотока может быть рассчитан по формуле:

$$U_c^{A/B}(y; W_l, W_g) = \frac{C_{c,g}^A(y; W_l, W_g)}{C_{c,g}^B(y; W_l, W_g)}.$$

Концентрационные профили и фактор разделения сложным образом зависят от скоростей движения исходной газовой смеси и жидкого носителя. С точки зрения оптимизации, важнейшими параметрами являются концентрации газов на выходе из мембранного абсорбера (в ретенате), т.е. в точке $y = h$, $C_{c,h}^A$ и $C_{c,h}^B$, а также коэффициент разделения в ретенате $U_{c,h}^{A/B}(W_g, W_l)$, определяющий чистоту целевого продукта А в ретенате.

Задача оптимизации состоит в подборе скоростей движения флюидов (W_g и W_l), обеспечивающих компромисс между производительностью системы разделения и чистотой продукта.

Перейдем теперь к рассмотрению ситуации противоположного направления движений жидкости и газа (режим противотока). С этой целью поменяем местами вход и выход в газовой камере абсорбционного модуля. Исходная газовая смесь вводится теперь со стороны выхода жидкости. Как и ранее, координата y направлена по направлению движения жидкости, газ движется в противоположном направлении.

Распределение концентрации одного из компонентов разделяемой смеси по абсорбционному модулю в газовой камере в режиме противотока:

$$C_{\Pi,g}(y) = C_h \frac{W_g \sigma_m - W_l \sigma_l e^{-\left[\frac{DS(\sigma_m W_g - \sigma_l W_l)}{hl m W_l W_g \sigma_l} \right] y}}{W_g \sigma_m - W_l \sigma_l e^{-\left[\frac{DS(\sigma_m W_g - \sigma_l W_l)}{lm W_l W_g \sigma_l} \right]}}$$

где C_h – концентрация газа на входе в мембранный абсорбер (в точке $y = h$).

Концентрация газа на выходе из абсорбционного модуля (в точке $y = 0$) в режиме противотока описывается формулой:

$$C_{\Pi,0}(W_g, W_l) = C_h \frac{W_g \sigma_m - W_l \sigma_l}{W_g \sigma_m - W_l \sigma_l e^{-\left[\frac{DS(\sigma_m W_g - \sigma_l W_l)}{lm W_l W_g \sigma_l} \right]}}$$

Коэффициент разделения бинарной газовой смеси (в точке $y = 0$) в режиме противотока:

$$U_{n,h}^{A/B}(y; W_l, W_g) = \frac{C_{gc,g}^A(y; W_l, W_g)}{C_{n,g}^B(y; W_l, W_g)}.$$

Как известно, основное преимущество мембранных устройств с подвижным жидким носителем заключается в возможности взаимной компенсации термодинамических и/или кинетических недостатков материала мембраны и жидкости. При этом часто обнаруживаются их скрытые (не проявляющиеся в традиционных методиках) возможности. Проиллюстрируем это на примере использования для целей газоразделения неселективных мембран и неселективных жидкостей.

Пусть необходимо разделить смесь газов А и В, где А – целевой компонент. В нашем распоряжении имеется мембрана, неселективная по отношению к этим

газам. Поскольку константы проницаемости $P^A = P^B$, то фактор селективности $Z = 1$ и разделение смеси газов А и В в стационарных условиях традиционного метода газопроницаемости невозможно. Имеющаяся в нашем распоряжении мембрана реализует условие $P^A = P^B$ следующим способом: $P^A = P^B$; но $D_m^A < D_m^B$ и $s_m^A > s_m^B$. Хотя такая мембрана бесполезна в стационарном варианте метода газопроницаемости, она может быть использована для разделения смеси газов в нестационарном варианте метода проницаемости и в мембранном контакторе с подвижным носителем.

Пусть далее в нашем распоряжении имеется абсорбционно активная, но неселективная к газам А и В жидкость. Поскольку константы растворимости газов А и В в жидкости одинаковы ($s_1^A = s_1^B$), то эта жидкость не может быть использована в абсорбере для разделения этих газов. Однако, как будет продемонстрировано ниже, в мембранном контакторе с подвижным носителем такая жидкость может быть использована с высокой эффективностью.

Совместим в проточном мембранном абсорбере выбранную нами мембрану и жидкость. Пусть для определенности $D_m^A = 1$, $D_m^B = 10$, $s_m^A = 10$, $s_m^B = 10$, $s_1^A = s_1^B = 1$.

Задачу будем решать методом математического эксперимента. В ходе моделирования диапазон изменения скорости движения газовой смеси составил $10^{-3} < W_g < 10^2$, а диапазон изменения скорости течения жидкости $10^{-3} < W_l < 10^3$. Рассмотрение ограничим случаем проточного режима работы МПА.

Расчеты профилей концентраций компонентов А и В в газовой камере абсорбционного модуля МПА в режиме сотака, $C_{C,g}^A(y)$ и $C_{C,g}^B(y)$ соответственно показали, что при движении вдоль АМ концентрации обоих компонентов смеси в газовой камере над мембраной падают по параболическому закону. В частном случае при одинаковых скоростях движения флюидов $W_g = W_l = 0,04$ значение концентрации $C^B(y)$ быстро диффундирующего компонента В падает от 1 (на входе в абсорбционный модуль) до $\sim 0,5$ (на выходе из абсорбционного модуля). При этом концентрация $C^A(y)$ «медленного» компонента А изменяется менее чем на 1%. Чем меньше скорость движения флюида W , тем круче спадает концентрация газа при движении от входа к выходу АМ МПА (рис. 1, а). Наоборот, в жидком абсорбенте значение концентрации газа В возрастает от 0 (на входе) до 0,5 (на выходе), тогда как концентрация газа А поддерживается практически на фоновом уровне. Таким образом, величина коэффициента диффузии газа в полимере существенным образом влияет на форму концентрационного профиля, причем чем меньше скорость движения газовой смеси

или жидкости, тем эффективнее работает мембранный абсорбер.

Типичные графики зависимости $U = C_g^A(y)/C_g^B(y)$ локального коэффициента разделения смеси газов А и В в газовой камере АМ МА от расстояния от входа в газую камеру АМ при различных скоростях движения флюидов приведены на рис. 1, б. Видно, что при всех значениях W величина $U > 1$, т.е. при движении вдоль модуля смесь газов над мембраной обогащается «медленным», но хорошо растворимым в полимере газом. В мембранном абсорбере «бесконечной» длины график $U_c(y)$ всегда имеет максимум (особенно четко проявляющийся при малых скоростях движения флюидов, причем чем ниже W , тем ближе ко входу в АМ располагается максимум), но при реальных длинах

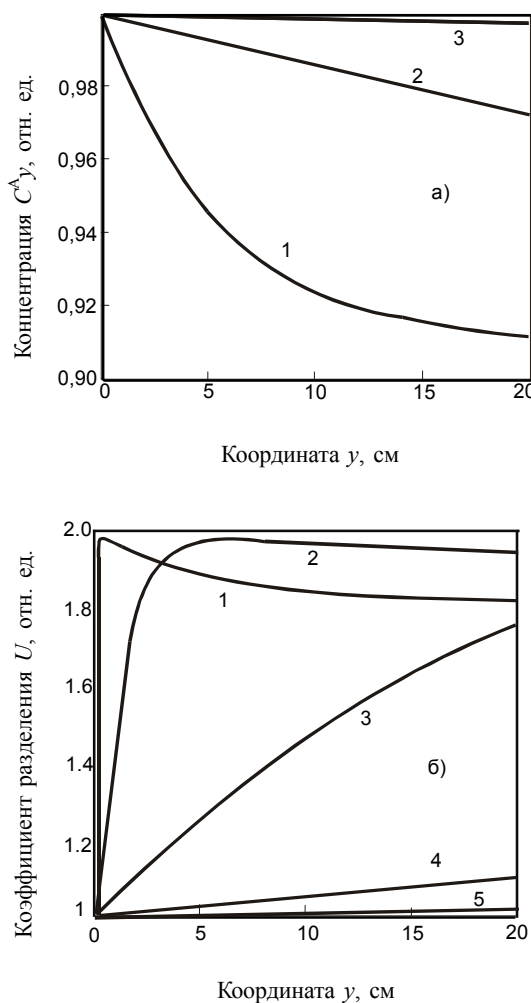


Рис. 1. Влияние объемной скорости движения флюидов ($W_g = W_l = W$) на величины локальных характеристик разделения двухкомпонентной смеси в абсорбционном модуле мембранного пермабсорбера в режиме одинакового направления движения газовой смеси и жидкого носителя: а – распределение концентрации целевого компонента разделяемой смеси (вещество А) вдоль газовой камеры мембранного абсорбционного модуля при значениях W : 1 – 0,01; 2 – 0,1; 3 – 1,0; б – распределение по длине мембраны локального коэффициента разделения смеси газов А и В при значениях W : 1 – 0,001; 2 – 0,01; 3 – 0,1

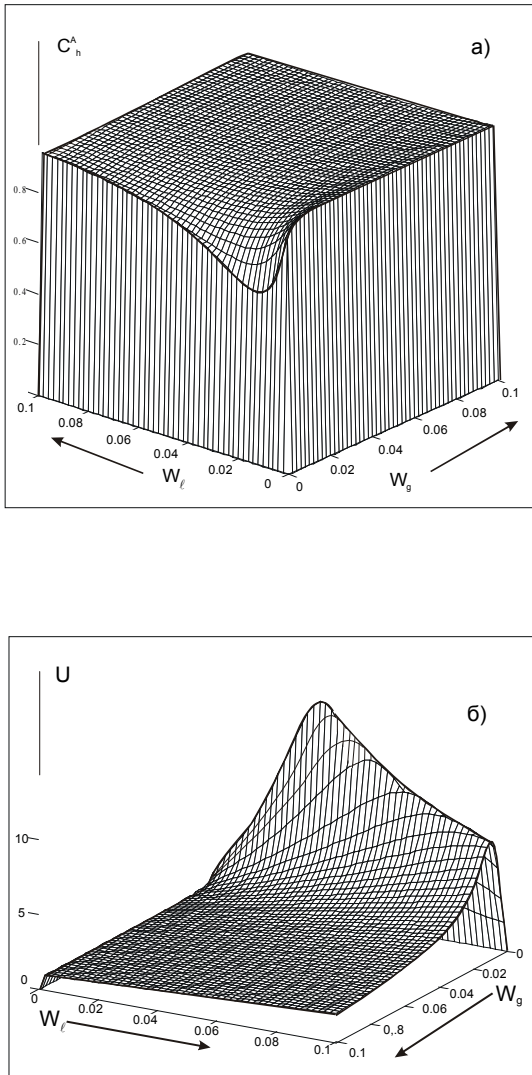


Рис. 2. Зависимость производительности и селективности разделения мембранного абсорбционного модуля с подвижным жидким носителем в режиме сотака от скоростей течения газовой смеси (W_g) и жидкого носителя (W_l): а – концентрация целевого компонента на выходе из газовой камеры абсорбционного модуля (в ретенате); б – коэффициент разделения двухкомпонентной смеси газов в ретенате

мембранного абсорбера существуют значения W , при превышении которых $U_c(y)$ монотонно возрастает при движении от входа к выходу АМ МПА.

В процессе оптимизации работы АМ МПА целевыми параметрами выступают две функции: функция $C_h^A(W_g, W_l)$ – концентрация целевого компонента А на выходе из газовой камеры абсорбционного модуля (в точке $y = h$) и функция $U^{A/B}(W_g, W_l)$ – коэффициент разделения смеси газов А и В, определяющий чистоту целевого компонента А. Оба этих параметра в различной степени зависят от скоростей движения как газовой смеси W_g , так и жидкости W_l . Концентрация компо-

нента А на выходе из газовой камеры МА проходит через минимум при изменении как W_g , так и W_l . Аналогичны вышеописанным графики функций $C_h^B(W_g)$ и $C_h^B(W_l)$. Фактор разделения существенным образом зависит от скоростей движения флюидов: графики функций $U_{c,h}(W_g)$ и $U_{c,h}(W_l)$ по мере роста скорости движения газа или жидкости быстро достигают максимального значения, после чего начинают медленно уменьшаться.

Математическое моделирование позволяет ответить на вопрос: изменение скорости течения какого именно флюида (W_g или W_l) оказывает наибольшее влияние на производительность абсорбционного модуля и на чистоту целевого продукта в ретенате. При малых скоростях движения на концентрацию целевого компонента

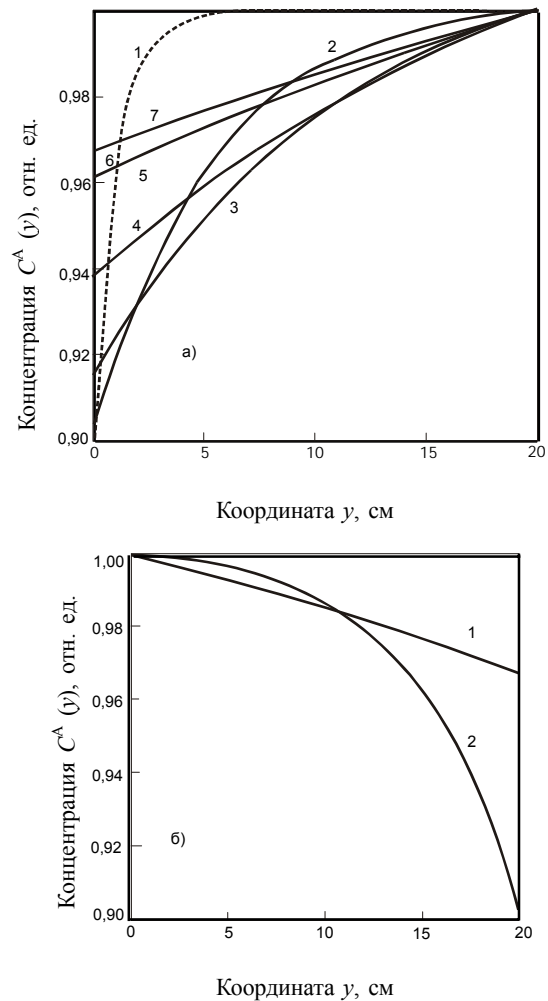


Рис. 3. Распределение концентрации целевого компонента разделяемой смеси (вещество А) вдоль газовой камеры мембранного абсорбционного модуля: а – концентрационные профили в режиме противоположного направления движения газовой смеси и жидкого носителя (противоток) при различных скоростях движения флюидов при значении W : 1 – 0,02; 2 – 0,1; 3 – 0,2; б – концентрационные профили целевого компонента в различных режимах работы абсорбционного модуля мембранного пермабсорбера: 1 – соток, 2 – противоток ($W = 0,1$)

на выходе из абсорбера существенно влияет скорость движения газовой смеси W_g , а при больших скоростях – скорость движения жидкого абсорбента W_l . Характер инверсии кривых $C_h^A(W_l)$ и $C_h^A(W_g)$ можно проиллюстрировать численным примером. При $W_g = 0,01$ график $C_h^A(W_l)$ достигает минимума $C_h^A(W_l = 0,01) = 0,972$, а при $W_l = 0,1$ график $C_h^A(W_g)$ проходит через минимум (имеет вид узкого «отрицательного» пика, несколько меньшей амплитуды и при существенно меньших скоростях движения флюида, чем в первом случае) $C_h^A(W_g = 0,001) = 0,91$. При скоростях движения флюидов $W < 0,01$, $C_h^A(W_g) \in C_l^A(W_l)$, а при больших скоростях, наоборот, $C_h^A(W_l) \in C_l^A(W_g)$. Например, $C_h^A(W_l = 0,05) = 0,983$, а $C_h^A(W_g = 0,05) = 0,994$. Фактор разделения $U_h(W_g)$ или $U_l(W_l)$ имеет форму пика, тем лучше выраженного, чем меньше скорость движения флюида. Изменение скоростей движения флюидов W_g и W_l позволяет в широких пределах изменять фактор разделения двухкомпонентной смеси на выходе из газовой камеры мембранного абсорбера. При этом график функции $U_h(W_l)$ имеет пик при сравнительно больших скоростях движения жидкости, тогда как график $U_h(W_g)$ имеет вид пика (значительно более высокого и узкого по сравнению с первым случаем) при существенно более низких скоростях движения смеси газов. Например, при $W_g = 0,01$ достигается максимум $U_h(W_l = 0,031) = 3,54$, тогда как при $W_l = 0,01$ достигается величина $U_h(W_g = 0,001) = 8,71$.

На рис. 2, а, б приведены трехмерные графики функций $C_h^A(W_g, W_l)$ и $U_h^{A/B}(W_g, W_l)$. При больших скоростях течения концентрация целевого газа на выходе из МА практически постоянна и не зависит ни от W_g , ни от W_l . Однако при малых скоростях движения флюидов система становится неустойчивой: незначительное изменение скорости движения газа или жидкости способно привести к существенному изменению производительности системы. Коэффициент разделения двухкомпонентной смеси газов при малых значениях W_g неустойчив практически при всех значениях W_l . Очевидно, что подбор скоростей движения флюидов, обеспечивающих одновременно достижение как максимальной производительности, так и чистоты целевого продукта в ретенате, представляет собой весьма сложную задачу.

Перейдем теперь к анализу соответствующих зависимостей для режима противотока.

Влияние скорости движения флюида W ($W_g = W_l = W$) на характер распределения вдоль мембраны концентрации компонента А показано на рис. 3, а, где ($y = 20$) – вход в газовую камеру мембранного абсорбера, ($y = 0$) – выход из нее. Видно, что при увеличении W имеет место инверсия кривых. При изменении

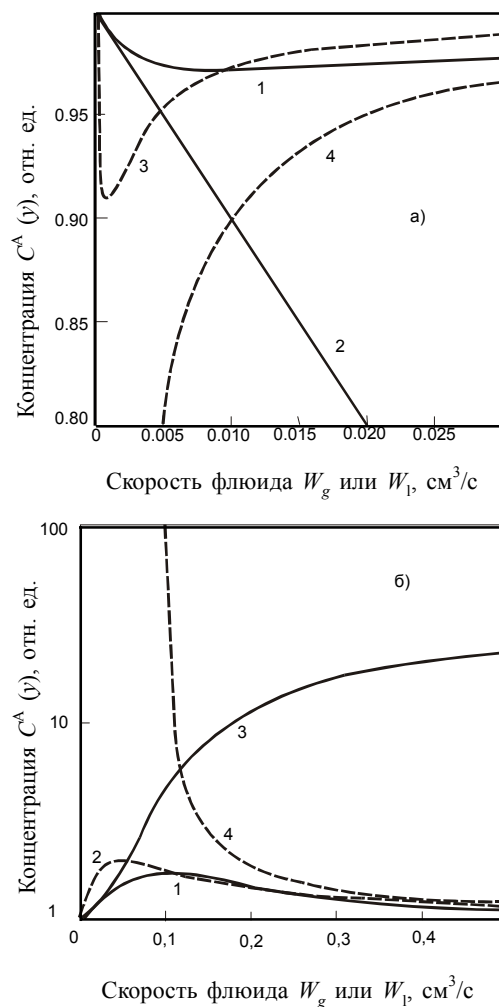


Рис. 4. Влияние скорости движения флюидов (W_g и W_l) и взаимного направления их движения на эффективность работы абсорбционного модуля с точки зрения очистки ретената: а – концентрация целевого газа А в ретенате; б – фактор разделения двухкомпонентной смеси газов в ретенате: 1 – соток, ($C_h^A(W_l)$, $W_g = 0,01$); 2 – противоток ($C_0^A(W_l)$, $W_g = 0,01$); 3 – соток ($C_h^A(W_g)$, $W_l = 0,01$); 4 – противоток ($C_0^A(W_g)$, $W_l = 0,01$)

скорости какого-либо флюида в диапазоне $0,002 < W < 1$ концентрация в центре мембраны (в точке $y = 10$) достигает минимума при $W = 0,2$, причем $C^A(y = 10, W = 0,2) = 0,975$. На выходе из мембранного абсорбера (в ретенате) в точке $y = 0$ в том же диапазоне скоростей движения флюидов при увеличении W значение концентрации газа А монотонно увеличивается от $C^A(y = 0, W = 0,02) = 0,9$ до $C^A(y = 0, W = 1) = 0,968$. Как и в случае сотока, в противоточном режиме течение жидкости и газа оказывает большее влияние на профиль быстрого компонента В, чем на профиль медленного компонента А. Режим противотока эффективнее режима сотока (см. рис. 3, б, построенный для концентрационного профиля целевого компонента А, где для удобства сравнения координаты в газовой камере и в камере для жидкости заданы одинаково направленными ($y = 0$ – вход, $y = 20$ – выход)). Видно, что при движении вдоль мембраны наблюдается инверсия кривых

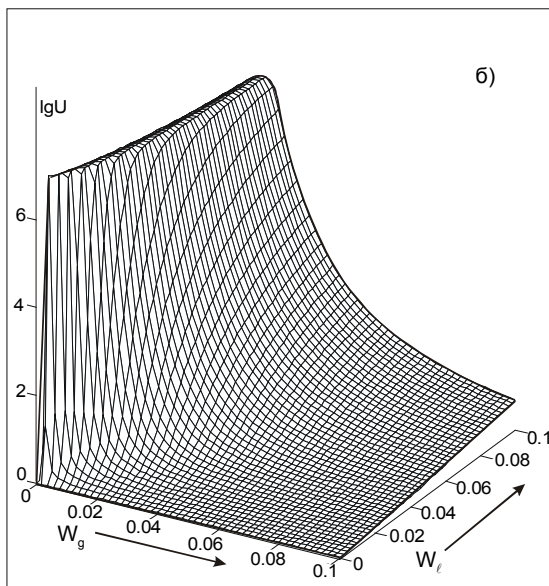
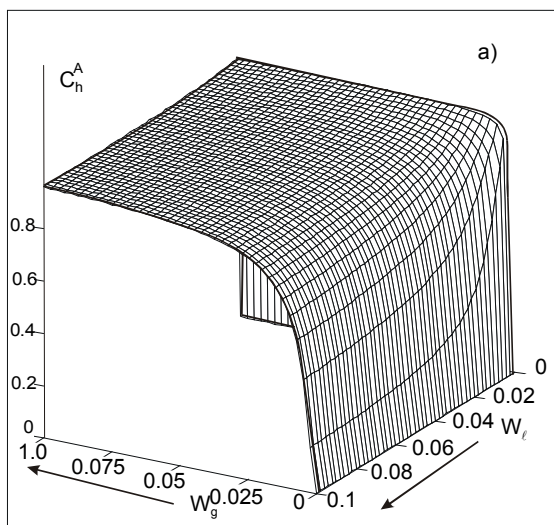


Рис. 5. Зависимость производительности и селективности разделения мембранного абсорбционного модуля с подвижным жидким носителем в режиме противотока от скорости течения газовой смеси (W_g) и жидкого носителя (W_l): а – концентрация целевого компонента на выходе из газовой камеры абсорбционного модуля (в ретенате); б – коэффициент разделения двухкомпонентной смеси газов в ретенате

вых, описывающих концентрационные профили газов. Для нашего примера при $W = 0,1$ в передней части модуля концентрация в режиме сотока $C_c^A(y = 5) = 0,993$ меньше концентрации в режиме противотока $C_n^A(y = 5) = 0,996$, в центре модуля эти концентрации практически одинаковы $C_c^A(y = 10) = 0,985$, $C_n^A(y = 10) = 0,986$, но на выходе из АМ концентрация в режиме сотока $C_c^A(y = 20) = 0,968$ больше концентрации в режиме противотока $C_n^A(y = 20) = 0,902$. Локальный коэффициент разделения смеси $U(y)$ при движении вдоль мембраны монотонно уменьшается, причем чем мень-

ше скорость движения флюида, тем круче падение. При изменении W в диапазоне $0,01 < W < 10$ в центре мембраны U_{Π} уменьшается от значения 1,95 до 1,02, а на выходе из модуля – от значения 36,9 до 1,04.

Как и в сотоке, на производительность МПА по ретенату влияет скорость как движения газовой смеси, так и течения жидкости. Однако в отличие от сотока, в противотоке W_g и W_l влияют на C^A противоположным образом.

При увеличении скорости движения жидкости концентрация газа А падает (эффект тем сильнее, чем меньше скорость движения газа). В нашем примере $C_h^A(W_l = 0,1, W_g = 0,01) = 0,2$, $C_h^A(W_l = 0,1, W_g = 0,1) = 0,902$ и $C_h^A(W_l = 0,1, W_g = 1) = 0,99$.

При увеличении скорости движения газовой смеси концентрация А в ретенате монотонно возрастает, стремясь к постоянному значению, и тем круче, чем меньше скорость движения жидкости. Например, при $W_g = 0,1$ изменение скорости движения жидкости в диапазоне $0,01 \leq W_l \leq 100$ приводит к падению концентрации газа А в ретенате от 0,99 до 0,671. Коэффициент разделения двухкомпонентной смеси $U_{\Pi, h}$ также по-разному зависит от W_g и W_l .

При увеличении W_l $U_{\Pi, h}(W_l)$ – возрастающая функция, причем чем выше значение W_g , тем меньше изменение коэффициента разделения. При $W_l = 0,1$ в диапазоне скоростей $0,01 < W_g < 10$ коэффициент разделения падает от 10,15 до 1,01. Функция $U_{\Pi, h}(W_g)$ – монотонно ниспадающая, причем чем выше W_l , тем больше коэффициент разделения. Например, значение $U_{\Pi, h}$ возрастает от 1,1 до 35,8 при изменении скорости течения жидкости в диапазоне $0,01 \leq W_l \leq 10$ и $W_g = 0,1$.

На рис. 4 показана высокая эффективность взаимоположенного направления движений флюидов по сравнению с одинаковыми направлениями течения газовой смеси и жидкости с точки зрения как производительности (рис. 4, а), так и чистоты целевого продукта (рис. 4, б). При этом видно, что если зависимости параметров оптимизации от скоростей движения флюидов в режиме сотока имели экстремумы, то в случае противотока имеют место монотонные кривые.

На рис. 5 (для наглядности в трехмерном виде) показано влияние скоростей движения флюидов на концентрацию газа А и коэффициент разделения бинарной смеси. В связи с большим диапазоном изменения величины коэффициента разделения ось ординат построена в логарифмическом масштабе. Видно, что при малых значениях W_g и W_l изменение скоростей движения флюидов практически не влияет на концентрацию целевого газа (рис. 5, а).

При малых значениях W_g роль скорости движения жидкости становится весьма существенной. Коэффициент разделения смеси в ретентате сильно изменяется при малых величинах как W_g , так и W_1 (рис. 5, б).

Таким образом, проведенное математическое моделирование показало, что неселективные мембраны и жидкие абсорбенты, бесперспективные с точки зрения традиционных (стационарных или равновесных) вариантов методов мембранной технологии и абсорбционного разделения, соответственно при использовании их в мембранном абсорбере с подвижным жидким носителем позволяют эффективно разделять двух компонентную смесь газов. На производительность абсорбционного модуля и чистоту продукта в ретентате существенное влияние оказывает взаимное направление движения разделяемой смеси газов и жидкого абсорбента.

Путем варьирования скоростей течения флюидов возможно управление системой разделения и достижение компромисса между производительностью, чистотой продукта и устойчивостью разделительного процесса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Beckman I.N., Shelekhin A.B., Teplyakov V.V. // J. Membr. Sci. 1991. **55**. P. 283.
2. Бессарабов Д.Г., Бекман И.Н. // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 2. Химия. 1993. **34**. С. 604.
3. Бессарабов Д.Г., Сырцова Д.А., Тепляков В.В., Бекман И.Н. // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 2. Химия. 1994. **35**. С. 385.
4. Bessarabov D.G., Sanderson R.D., Jacobs E.P., Beckman I.N. // Ing. Eng. Chem. Res. 1995. **34**. С. 1769.
5. Bessarabov D.G., Jacobs E.P., Sanderson R.D., Beckman I.N. // J. Membr. Sci. 1996. **113**. P. 275.

Поступила в редакцию 10.09.99