УЛК 66.081.6

ВЛИЯНИЕ ВЯЗКОГО ТЕЧЕНИЯ ГАЗА И ПОРИСТОЙ СТРУКТУРЫ ПОДЛОЖКИ НА ПРОНИЦАЕМОСТЬ КОМПОЗИЦИОННОЙ МЕМБРАНЫ

© 2020 г. В. В. Угрозов^{1, 2, *}, А. В. Волков¹

¹Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева РАН Ленинский проспект, 29, Москва, 119991 Россия

 2 Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, департамент анализа данных, принятия решений и финансовых технологий ул. Щербаковская, 38, Москва, 123995 Россия

*e-mail: vugr@rambler.ru

Поступила в редакцию 15.01.2020 г. После доработки 10.03.2020 г. Принята к публикации 12.03.2020 г.

В рамках модели сопротивлений получено выражение для проницаемости композиционной мембраны с учетом вязкого течения газа и пористой структуры подложки. С помощью математического моделирования показано, что в случае, когда в поры скин-слоя подложки не проникает материал селективного слоя, влияние вязкого течения газа в подложке на проницаемость и селективность композиционной мембраны может быть заметным, и оно возрастает при уменьшении эффективной пористости и росте проницаемости селективного слоя. Установлено, что влияние пористой структуры подложки на проницаемость композиционной мембраны ослабевает с возрастанием эффективной пористости скин-слоя подложки и среднего размера пор. Подробно проанализирован случай заполнения материалом селективного слоя пор подложки на всю глубину скин-слоя. Показано, что в этом случае влияние подложки на проницаемость мембраны определяется только пористостью скин-слоя и соотношением толщин скин-слоя подложки и селективного слоя.

DOI: 10.31857/S0023291220040151

1. ВВЕДЕНИЕ

В последнее время активно разрабатываются и экспериментально исследуются новые эффективные композиционные газоразделительные мембраны [1-10], представляющие собой двухили многослойные мембраны, в которых на пористую подложку наносится непористый полимерный селективный слой (для его обозначения ниже используется индекс s), обеспечивающий разделение газов. Подложка композиционной мембраны (КМ) имеет асимметричную структуру и состоит из пористого слоя, который в дальнейшем, согласно [11], будем называть скин-слоем (индекс sk), и макропористого слоя (индекс p), армирующего мембрану и не оказывающего заметного сопротивления газопереносу (рис. 1а).

Для описания газопереноса в КМ традиционно используется модель сопротивлений (МС) [12, 13], в рамках которой поток газа через КМ рассматривается как ток, протекающий через последовательно соединенные постоянные сопротивления, имитирующие селективный слой и подложку КМ (рис. 1б). Создание новых КМ, у

которых проницаемость селективного слоя сравнима с проницаемостью подложки, порождает необходимость моделирования газопереноса в таких мембранах с учетом влияния пористой структуры подложки на их проницаемость [14], которым ранее в рамках МС пренебрегали. Это влияние может быть заметным и при проникновении материала селективного слоя в поры подложки, что существенно уменьшает ее проницаемость [1, 5, 15-17]. Для ослабления этого влияния разрабатываются различные методы [1, 8, 18-22]. Следует также отметить, что в рамках МС обычно предполагается, что сопротивление подложки постоянно и определяется только кнудсеновской диффузией, а влияние вязкого течения не учитывается, хотя в исследованиях проницаемости различных пористых подложек КМ по отношению к индивидуальным газам [23-25] данное течение наблюдается экспериментально. Таким образом, очевидно, что учет указанных факторов в МС актуален, так как позволит более адекватно моделировать газоперенос в новых КМ и оптимизировать их газоразделительные характеристики.

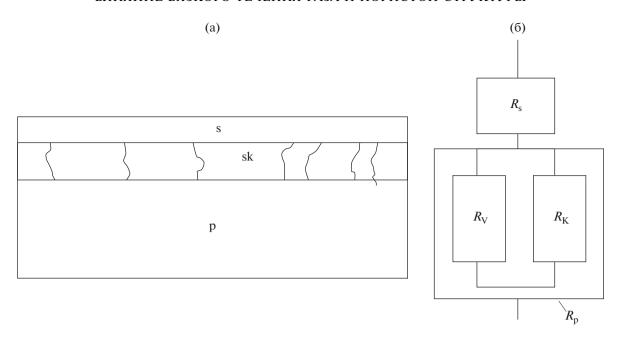


Рис. 1. Схематическое представление структуры композиционной мембраны (а) и модели сопротивлений (б) для описания газопереноса в КМ. $R_{\rm S}$ и $R_{\rm p}$ — сопротивления газопереносу селективного слоя и подложки соответственно; $R_{\rm V}$ и $R_{\rm K}$ — сопротивления подложки кнудсеновскому и вязкому течению соответственно.

Поэтому цель данной работы состоит в обобщении МС с учетом вязкого течения газа и установлении степени влияния этого течения, а также пористой структуры подложки на газоразделительные характеристики КМ.

2. ПЕРЕНОС ГАЗА ЧЕРЕЗ КОМПОЗИЦИОННУЮ МЕМБРАНУ

В рамках МС поток газа через селективный слой КМ лимитируется диффузией и описывается выражением

$$V_{\rm s} = (p_{\rm in} - p_{\rm sp})/R_{\rm s} = Q_{\rm s}S_{\rm m}(p_{\rm in} - p_{\rm sp}),$$
 (1)

где $Q_{\rm s}$ — проницаемость селективного слоя, $S_{\rm m}$ — площадь мембраны, $p_{\rm in}$ — давление газа, диффундирующего через мембрану (диффузанта), $R_{\rm s}=1/Q_{\rm s}S_{\rm m}$ — сопротивление селективного слоя газопереносу, $Q_{\rm s}=P_{\rm s}/l_{\rm s}$, $P_{\rm s}$ и $l_{\rm s}$ — коэффициент проницаемости и толщина селективного слоя, $p_{\rm sp}$ — давление газа на границе между селективным слоем и пористой подложкой.

Соответственно, поток газа через пористую подложку описывается выражением

$$V_{\rm p} = (p_{\rm sp} - p_{\rm out})/R_{\rm p} = Q_{\rm p}S_{\rm m}(p_{\rm sp} - p_{\rm out}),$$
 (2)

где $Q_{\rm p}$ — проницаемость подложки, $R_{\rm p}=1/Q_{\rm p}S_{\rm m}$ — сопротивление подложки газопереносу, $p_{\rm out}$ — давление продиффундировавшего через мембрану газа (пермеата).

В дальнейшем для описания газопереноса в пористой подложке воспользуемся моделью запыленного газа [26, 27], в рамках которой справедливо следующее соотношение:

$$Q_{\rm p} = Q_{\rm K} + Q_{\rm V},\tag{3}$$

где $Q_{\rm K} = K$ и $Q_{\rm V} = B$ — проницаемости подложки, обусловленные кнудсеновским и вязким течени-

ями,
$$K = K_0 \frac{4}{3} \left(\frac{8RT}{\pi M} \right)^{\frac{1}{2}}$$
, $B = \frac{B_0}{\mu} \overline{p}$, K_0 и B_0 — струк-

турные параметры пористой подложки, R — газовая константа, T — температура, M и μ — молекулярная масса и вязкость газа, соответственно,

$$\overline{p} = \frac{\left(p_{\rm sp} + p_{\rm out}\right)}{2}$$
 — среднее давление газа на подложке.

Тогда сопротивление подложки газопереносу определяется двумя параллельно соединенными сопротивлениями $R_{\rm K}$ и $R_{\rm V}$ (рис. 1б), и его можно определить как

$$\frac{1}{R_{\rm n}} = \frac{1}{R_{\rm K}} + \frac{1}{R_{\rm V}},\tag{4}$$

где $R_{\rm K}=1/Q_{\rm K}S_{\rm m}$ и $R_{\rm V}=1/Q_{\rm V}S_{\rm m}$ — сопротивления подложки кнудсеновскому и вязкому течению соответственно.

Запишем уравнения (1), (2) в безразмерном виде

$$V_{\rm s}/p_{\rm in}Q_{\rm s}S_{\rm m} = (1 - y_{\rm sn}),$$
 (5)

$$V_{\rm p}/p_{\rm in}Q_{\rm s}S_{\rm m} = (ay_{\rm sp} - ax_{\rm oi} + by_{\rm sp}^2 - bx_{\rm oi}^2),$$
 (6)

где $y_{
m sp}=p_{
m sp}/p_{
m in}$, $x_{
m oi}=p_{
m out}/p_{
m in}$, $a=Q_{
m K}/Q_{
m s}=R_{
m s}/R_{
m K}$, $b=B_0p_{
m in}/\mu Q_{
m s}$.

Из (5), (6) с учетом равенства потоков через слои композиционной мембраны (т.е. $V_{\rm s}=V_{\rm p}=V_{\rm c}$, где $V_{\rm c}=Q_{\rm c}S_{\rm m}p_{\rm in}\left(1-x_{\rm oi}\right)$ — поток газа через КМ, $Q_{\rm c}$ — ее проницаемость) получим

$$by_{\rm sp}^2 + (a+1)y_{\rm sp} - (1 + ax_{\rm oi} + bx_{\rm oi}^2) = 0.$$
 (7)

Из уравнения (7) с учетом того, что $y_{\rm sp} > 0$, находим

$$y_{\rm sp} = \frac{-(a+1)+I}{2h},$$
 (8)

где
$$I = \sqrt{(a+1)^2 + 4b(1 + ax_{oi} + bx_{oi}^2)}$$
.

Тогда, используя соотношения (5), (8), получим

$$V_{\rm s} = p_{\rm in}Q_{\rm s}S_{\rm m}(1-y_{\rm sp}). \tag{9}$$

С учетом непрерывности потока газа через мембрану и уравнения (9) имеем:

$$\frac{Q_{\rm c}}{Q_{\rm c}} = (1 - y_{\rm sp}) / (1 - x_{\rm oi}). \tag{10}$$

Из соотношения (10) с учетом (8) следует, что влияние вязкого течения и пористой структуры подложки на проницаемость КМ зависит от трех безразмерных параметров: a, b и x_{oi} .

Параметр b можно также записать в виде $b=B_0p_{\rm in}/\mu Q_{\rm s}=B/\overline{x}Q_{\rm s}=R_{\rm s}/R_{\rm V}\overline{x}$, где $\overline{x}=\overline{p}/p_{\rm in}$, $\overline{p}=(p_{\rm in}+p_{\rm out})/2$ —среднее давление в мембране.

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Будем в дальнейшем предполагать, что проницаемость селективного слоя КМ толщиной I_s равна проницаемости Q_v свободной пленки того же полимера такой же толщины (т.е. $Q_s = Q_v$). Тогда для оценки степени влияния подложки на проницаемость мембраны Q_c можно использовать параметр эффективной проницаемости КМ $\beta = \frac{Q_c}{Q_c}$.

метр эффективной проницаемости КМ $\beta = \frac{Q_{\rm c}}{Q_{\rm v}}$.

С учетом сделанного предположения и соотношения (10) параметр β задается следующим выражением:

$$\beta = (1 - y_{\rm sp}) / (1 - x_{\rm oi}). \tag{11}$$

Используя (11) с учетом (8), можно показать, что в отсутствие вязкого течения данный параметр описывается выражением вида

$$\beta_0 = \frac{Q_{c0}}{Q_v} = a/(1+a), \tag{12}$$

где $Q_{\rm c0}$ — проницаемость мембраны без учета вязкого течения (т.е. при b=0).

С учетом (11) и (12), коэффициенты идеальной селективности разделения смеси газов CO_2/N_2 с учетом и без учета вязкого течения, α и α_0 , соответственно, могут быть записаны в виде

$$\alpha = \frac{Q_{\text{vCO}_2}}{Q_{\text{vN}_2}} \frac{(1 - y_{\text{spCO}_2})}{(1 - y_{\text{spN}_2})}, \quad \alpha_0 = \frac{Q_{\text{vCO}_2}}{Q_{\text{vN}_2}} \frac{a_{\text{CO}_2}}{a_{\text{N}_2}} \frac{(1 + a_{\text{N}_2})}{(1 + a_{\text{CO}_2})}, \quad (13)$$

где $Q_{\rm vCO_2}$ и $Q_{\rm vN_2}$ — проницаемости КМ по СО $_2$ и N $_2$, $a_{\rm CO_2}$ и $a_{\rm N_2}$, $y_{\rm spCO_2}$ и $y_{\rm spN_2}$ определяются из соотношений (5) и (8) соответственно.

Для оценки структурных коэффициентов воспользуемся их аналитическими выражениями вида [23, 28]

$$K_0 = 1.6 \frac{\varepsilon}{q^2} \frac{r}{RTl_{\rm sk}}, \quad B_0 = \frac{r}{2} K_0,$$
 (14)

где r — средний радиус пор, ε и $l_{\rm sk}$ — поверхностная пористость и толщина скин-слоя подложки, q — извилистость пор.

Тогда, подставляя (14) в выражения для параметров *а* и *b*, получим следующие зависимости:

$$a = Q_{\rm K}/Q_{\rm s} = 1.6 \frac{\varepsilon}{q^2} \frac{r}{l_{\rm sk}} \frac{\frac{4}{3} \langle v \rangle}{Q_{\rm s} RT},\tag{15}$$

$$b = Q_{\rm V}/Q_{\rm s} = a \frac{r}{\frac{\mu}{p_{\rm in}}} \frac{4}{3} \langle v \rangle, \tag{16}$$

где $\langle v \rangle = \left(\frac{8RT}{\pi M}\right)^{\frac{1}{2}}$ — средняя скорость молекул газа,

 $\frac{\varepsilon}{q^2}$ — эффективная пористость скин-слоя.

Из соотношений (15), (16) следует, что влияние пористой структуры подложки определяется следующими безразмерными параметрами: $r/l_{\rm sk}$,

$$\frac{\varepsilon}{q^2}$$
 $\frac{r}{\frac{\mu}{p_{\rm in}}} \frac{4}{3} \langle v \rangle$.

С помощью полученных соотношений и программного пакета Mathcad 15 было количественно проанализировано влияние структурных параметров подложки и вязкого течения на проницаемость КМ. Расчеты выполнялись при следующих значениях параметров: $l_{\rm sk}=500$ нм, $l_{\rm s}=150$ нм, T=295 K, $P_{\rm CO_2}=3632$ баррер (1 баррер = 0.76×10^{-17} м³ (н.у.)/(м² с)) и $P_{\rm N_2}=330$ баррер – коэффициенты проницаемости селективного слоя из полидиметилсилоксана для $\rm CO_2$ и $\rm N_2$ [29]. Динамическая вязкость газа рассчитывалась по фор-

муле Сазерленда $\mu(T)=\mu_0\frac{T_0+C}{T+C}\bigg(\frac{T}{T_0}\bigg)^{3/2},$ где $\mu-$ динамическая вязкость при заданной температу-

Таблица 1. Значения постоянной Сазерленда C и вязкости некоторых газов [30]

| Газ | C, K | T_0 , K | μ ₀ , мкПа с |
|----------------|------|-----------|-------------------------|
| Азот | 111 | 300.55 | 17.81 |
| Кислород | 127 | 292.25 | 20.18 |
| Углекислый газ | 240 | 293.15 | 14.8 |
| Водород | 72 | 293.85 | 8.76 |

ре T, μ_0 — вязкость (мк Π а с) при некоторой температуре T_0 , C — постоянная Сазерленда, значения которой для ряда газов приведены в табл. 1.

В результате проведенного моделирования было установлено (рис. 2), что влияние подложки на проницаемость КМ ослабевает (значение β увеличивается) с возрастанием эффективной пористости скин-слоя подложки. Кроме того, как следует из рис. 2, степень влияния подложки существенно зависит от природы газа.

Также было обнаружено, что степень влияния подложки на проницаемость КМ зависит от величины давления диффузанта $p_{\rm in}$ и отношения давлений на входе и выходе из мембраны $x_{\rm oi} = p_{\rm out}/p_{\rm in}$. Как следует из рис. 3, влияние подложки ослабевает с увеличением $p_{\rm in}$ или $x_{\rm oi} = p_{\rm out}/p_{\rm in}$. Интересно отметить, что проницаемость КМ растет с $p_{\rm in}$. Данный эффект наблюдался экспериментально [31].

При анализе влияния вязкого течения на проницаемость КМ из соотношения (16) следует, что параметр b прямо пропорционален a и растет с увеличением давления или ростом среднего раз-

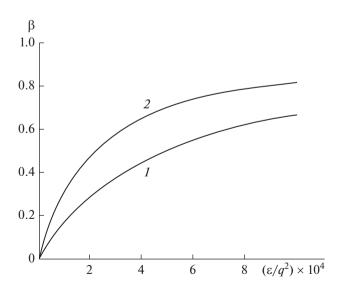


Рис. 2. Зависимость эффективной проницаемости КМ для ${\rm CO}_2$ (*I*) и ${\rm N}_2$ (*2*) от эффективной пористости скин-слоя подложки.

мера пор. Согласно молекулярно-кинетической теории газов $\mu = \frac{1}{3}\rho\langle v\rangle\lambda$, где ρ и λ — плотность газа и длина свободного пробега его молекул. Отсюда несложно показать, что $r/\frac{\mu}{p_{\rm in}} \frac{4}{3}\langle v\rangle \approx \frac{1}{{\rm Kn}}$, где κ и — число Кнудсена. Соответственно параметр κ и κ исложно следует, что при больших значениях κ и течение газа в подложке определяется только кнудсеновским течением, а при уменьшении его значений влияние вязкого течения возрастает.

Расчеты проницаемости КМ по отношению к ${\rm CO_2}$ и коэффициента идеальной селективности для смеси ${\rm CO_2/N_2}$ в зависимости от эффективной пористости скин-слоя подложки с учетом и без учета вязкого течения показали, что влияние вязкого течения на проницаемость КМ заметно при значениях $\frac{\varepsilon}{q^2} < 0.1\%$ и убывает с ее ростом (рис. 4). Влияние вязкого течения становится заметным при больших значениях $\frac{\varepsilon}{q}$ с уменьшением параметра a (т.е. при увеличении проницаемости селективного слоя) или уменьшения числа Кнудсена (т.е. при возрастании давления или среднего радиуса пор).

Расчет ошибки, возникающей при пренебрежении влиянием вязкого течения на проницае-

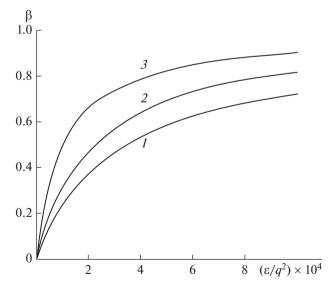


Рис. 3. Зависимость эффективной проницаемости КМ для CO_2 от эффективной пористости скин-слоя подложки при различных значениях x_{oi} : 0.1 (*I*) и 0.9 (*2*) при $p_{in} = 0.1$ МПа и 0.9 (*3*) при $p_{in} = 0.3$ МПа.

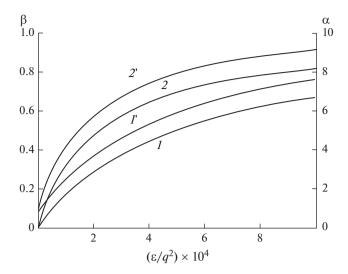


Рис. 4. Зависимости эффективной проницаемости КМ для CO_2 и коэффициента идеальной селективности для смеси CO_2/N_2 от эффективной пористости скин-слоя подложки с учетом (1 и 1) и без учета (2 и 2) вязкого течения.

мость KM, $\delta = \frac{(Q_{\rm c} - Q_{\rm c0})}{Q_{\rm c0}} \times 100\%$, в случае индивидуальных газов CO_2 и N_2 представлен на рис. 5. Видно, что она может достигать значений, превышающих 50%, и убывает с ростом эффективной пористости.

Зависимость относительной проницаемости КМ от отношения среднего радиуса пор к толщине скин-слоя, $z=\frac{r}{l_{\rm sk}}$, представлена на рис. 6. Видно, что влияние подложки на проницаемость КМ ослабевает с увеличением среднего радиуса пор (при фиксированном значении толщины скинслоя) или с уменьшением толщины скинслоя (при фиксированном значении среднего радиуса пор).

Представляет интерес сравнить полученные результаты с результатами для другого предельного режима, когда поры подложки заполняются полимером селективного слоя на всю глубину скин-слоя. В этом случае сопротивление подложки газопереносу определяется выражением вида

$$R_{\rm p} = l_{\rm sk} / P_{\rm s} S_{\rm p} \,, \tag{17}$$

где $S_{\rm p}$ — площадь всех пор на поверхности скинслоя подложки, $P_{\rm s}$ — коэффициент газопроницаемости селективного слоя.

Общее сопротивление мембраны газопереносу в данном случае определяется выражением вида

$$R_{\rm c} = R_{\rm s} + R_{\rm p} = l_{\rm s}/P_{\rm s}S_{\rm m} + l_{\rm sk}/P_{\rm s}S_{\rm p}$$
. (18)

Отсюда следует, что

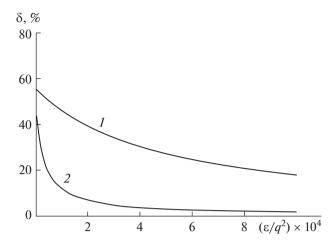


Рис. 5. Зависимость погрешности расчета эффективной проницаемости КМ для ${\rm CO}_2$ (*I*) и ${\rm N}_2$ (*2*) от эффективной пористости скин-слоя подложки.

$$1/Q_{c} = 1/Q_{s} + 1/Q_{p} = l_{s}/P_{s}S_{m} + l_{sk}/P_{s}S_{p}.$$
 (19)

В рассмотренном случае с учетом (19) параметр влияния подложки и коэффициент идеальной селективности описываются выражениями вида

$$\beta = \frac{Q_{\rm c}}{Q_{\rm s}} = 1 / \left(1 + \frac{l_{\rm sk}}{\varepsilon l_{\rm s}} \right), \quad \alpha_{\rm A/B} = \frac{P_{\rm sA}}{P_{\rm sB}}, \tag{20}$$

где $P_{\rm sA}$ и $P_{\rm sB}$ — коэффициенты проницаемости КМ по отношению к газам A и B соответственно.

Из соотношения (20) следует важный вывод о независимости параметра β от природы индивидуального газа, переносимого через КМ. Из дан-

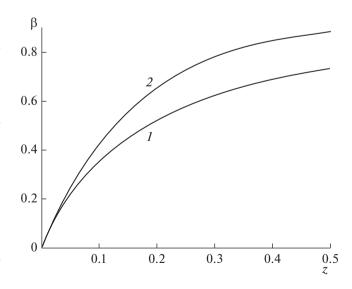


Рис. 6. Зависимость эффективной проницаемости КМ для ${\rm CO}_2$ от параметра z без учета (1) и с учетом (2) вязкого течения в подложке.

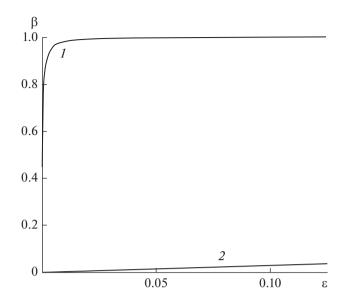


Рис. 7. Зависимость эффективной проницаемости КМ для CO_2 от поверхностной пористости скин-слоя подложки в случаях, когда материал селективного слоя не проникает (I) и проникает (I) в поры подложки.

ного соотношения также следует, что влияние подложки на проницаемость КМ убывает при уменьшении $\frac{l_{\rm sk}}{l_{\rm s}}$ или увеличении поверхностной пористости и не зависит от среднего размера пор (рис. 7). Соответственно на коэффициент идеальной селективности разделения, согласно (20), не влияет пористая структура подложки, и его величина определяется только отношением коэффициентов проницаемости КМ по индивидуальным газам. Расчет по формуле (20) показал, что проникновение материала селективного слоя в поры заметно снижает проницаемость мембраны (рис. 7), что согласуется с экспериментальными результатами [15—17].

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного моделирования установлено, что влияние подложки на проницаемость композиционной мембраны ослабевает с возрастанием эффективной пористости скинслоя подложки, среднего размера пор и уменьшением толщины скин-слоя. Оно также ослабевает с увеличением $p_{\rm in}$ или $x_{\rm oi}$.

Показано, что влияние вязкого течения газа в подложке на проницаемость и селективность КМ может быть заметным, и оно возрастает с уменьшением эффективной пористости скин-слоя и ростом проницаемости селективного слоя. В случае, когда все поры подложки заполняются полимером селективного слоя на глубину скин-слоя, влияние подложки на проницаемость КМ не за-

висит от природы газа и среднего размера пор и ослабевает при уменьшении значения отношения

 $\frac{l_{\rm sk}}{l_{\rm s}}$ или возрастании поверхностной пористости скин-слоя.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках Государственного задания ИНХС РАН.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. *Liang C.Z., Chung T.-S., Lai J.-Y.* // Prog. Polym. Sci. 2019. V. 97. Article 101141.
- Dai Z., Ansaloni L., Deng L. // Green Energy Environ. 2016. V. 1. P. 102.
- 3. Xie K., Fu Q., Qiao G.G., Webley P.A. // J. Membr. Sci. 2019. V. 572. P. 38.
- 4. *Liang C.Z., Liu J.T., Lai J.-Y., Chung T.-S.* // J. Membr. Sci. 2018. V. 563. P. 93.
- Chen H.Z., Xiao Y.C., Chung T.-S. // J. Membr. Sci. 2011. V. 381. P. 211.
- Li S., Wang Z., Yu X., Wang J., Wang S. // Adv. Mater. 2012. V. P. 3196.
- Selyanchyn R., Fujikawa S. // Sci. Technol. Adv. Mater. 2017. V. 18. P. 816.
- McVerry B., Anderson M., He N., Kweon H., Ji C., Xue S., Rao E., Lee C., Lin C.-W., Chen D., Jun D., Sant G., Kaner R.B. // Nano Lett. 2019. V. 19. P. 5036.
- Chen H.Z., Thong Z., Li P., Chung T.-S. // Int. J. Hydrogen Energ. 2014. V. 39. P. 5043.
- 10. Апель П.Ю., Бобрешова О.В., Волков А.В., Волков В.В., Никоненко В.В., Стенина И.А., Филиппов А.Н., Ямпольский Ю.П., Ярославцев А.Б. // Мембраны и мембранные технологии. 2019. Т. 9. С. 59.
- Henis J.M.S., Tripodi M.K. // Sep. Sci. Technol. 1980.
 V. 15. P. 1059.
- 12. Henis J.M.S., Tripodi M.K. // Science. 1983. V. 220. P. 11.
- Henis J.M.S., Tripodi M.K. // J. Membr. Sci. 1981. V. 8. P. 233.
- Liu L., Jiang N., Burns C.M., Chakma A., Feng X. // J. Membr. Sci. 2009. V. 338. P. 153.
- 15. Vankelecom I.F.J., Moermans B., Verschueren G., Jacobs P.A. // J. Membr. Sci. 1999. V. 158. P. 289.
- Clausi D.T., McKelvey S.A., Koros W.J. // J. Membr. Sci. 1999. V. 160. P. 51.
- 17. *Li P., Chen H.Z., Chung T.-S.* // J. Membr. Sci. 2013. V. 434. P. 18.
- Liu L., Chakma A., Feng X. // J. Membr. Sci. 2004.
 V. 235. P. 43.
- 19. Wang M., Wang Z., Li S., Zhang C., Wang J., Wang S. // Energy Environ. Sci. 2013. V. 6. P. 539.
- 20. Alf M.E., Asatekin A., Barr M.C., Baxamusa S.H., Chelawat H., Ozaydin-Ince G., Petruczok C.D., Sreenivasan R.,

- Tenhaeff W.E., Trujillo N.J., Vaddiraju S., Xu J., Gleason K.K. // Adv. Mater. 2010. V. 22. P. 1993.
- 21. Ozaydin-Ince G., Coclite A.M., Gleason K.K. // Rep. Prog. Phys. 2012. V. 75. P. 1.
- 22. Membrane Technology and Applications / Ed. by Baker R.W. New York: John Wiley and Sons, 2012.
- 23. Lillepärg J., Breitenkamp S., Shishatskiy S., Pohlmann J., Wind C., Scholles J. Brinkmann T. // Membranes. 2019. V. 9. № 2. Article 22.
- 24. Nakao S.I. // J. Membr. Sci. 1994. V. 96. P. 131.
- Beusher U., Gooding C.H. // J. Membr. Sci. 1997.
 V. 132. P. 213.

- 26. *Ролдугин В.И., Жданов В.М.* // Коллоид. журн. 2016. Т. 78. С. 349.
- Mason E.A., Malinauskas A.P. Gas Transport in Porous Media: The Dusty-Gas Model. Amsterdam: Elsevier, 1983.
- 28. *Cabasso I.*, *Robert K.*, *Klein E.*, *Smith J.* // J. Appl. Polym. Sci. 1977. V. 21. P. 1883.
- Selyanchyn R., Ariyoshi M., Fujikawa S. // Membranes. 2018. V. 8. P. 121.
- 30. Smits A.J., Dussauge J.-P. Turbulent Shear Layers in Supersonic Flow. New York: Springer, 2006.
- 31. *Shi M., Dong C., Wang Z., Tian X., Zhao S., Wang J.* // Chin. J. Chem. Eng. 2019. V. 27. P. 1807.