

УДК 539.12.01

ТРЕХМЕРНАЯ МОДЕЛЬ КИСЛОРОДНО-АЗОТНОГО ПЕРЕНОСА В ПОРИСТОМ ДИФFUЗОРЕ ВОДОРОДНОГО ТОПЛИВНОГО ЭЛЕМЕНТА С ПОЛИМЕРНЫМ ЭЛЕКТРОЛИТОМ

К. В. Жуковский, В. Ч. Жуковский

(кафедра оптики; кафедра теоретической физики)

E-mail: th180@phys.msu.su

Исследованы бинарная молекулярная диффузия и потоки газа под давлением в пористых средах. Развита 2-мерная модель переноса газа в пористой среде в полях давления и концентрации с отличными от нуля градиентами. Проанализировано пространственное распределение концентрации и потока кислорода в пористом диффузоре водородного топливного элемента с полимерным электролитом в зависимости от геометрических и физических параметров электрода. Проведено 3-мерное обобщение модели. Рассмотрены возможные применения для моделирования потоков кислорода в электродах топливных элементов с полимерным электролитом для двух простых конфигураций газовых каналов — змеевидного и дискретизованного.

Введение

Водородные топливные элементы на полимерных электролитах (ВТЭПЭ) представляют собой многообещающие альтернативные источники непосредственного получения электроэнергии при окислении водорода. Однако, для того чтобы источники энергии на основе такой технологии использовать на транспорте, необходимо разработать элементы с большой плотностью энергии. Три главных фактора, ограничивающие ток и приводящие к потерям на-

пряжения в ВТЭПЭ, сводятся к потерям активации в слое катализатора, находящегося в контакте с электродом и доступным реагирующим газам [1–4], омическим потерям за счет электронного, ионного и контактного сопротивлений элемента [5–9] и сопротивлению потокам газа в электроде, когда реагенты истощаются на поверхности катализатора, так как их перенос к месту реакции не поспевает за скоростью реакции. В частности, последнее явление, истощение на катоде, до настоящего времени не

было достаточно изучено. Единственным методом, с помощью которого удавалось преодолевать подобные ограничения переноса газа и увеличивать плотность энергии, была подача газа под давлением.

К настоящему моменту разработаны многочисленные теоретические модели ВТЭПЭ [10–17]. Однако они, как правило, сводятся к одномерным случаям. В недавних экспериментальных исследованиях было показано, что падение давления на выходе и геометрия подводящих газ каналов сильно влияют на эффективность элементов [18–20], однако они не могут быть учтены в одномерных моделях. Например, так называемая дискретизованная конфигурация подводящих каналов (рис. 1) существенным образом использует новые, основанные на давлении механизмы переноса газа, действующие в дополнение к обычной молекулярной диффузии. Этот механизм также дает существенный вклад в перенос газа при заметных градиентах давления в высокопористых электродах со змеевидной формой канала (рис. 1). Если газ, в дополнение к обычному течению в каналах, заставляет протекать еще и внутри диффузионного слоя, то перенос газовых реагентов и продуктов реакции к слоям катализатора и от них превращается из чисто молекулярного диффузионного процесса в вынужденную конвекцию.

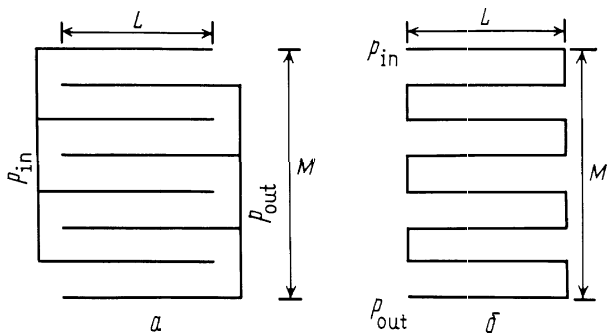


Рис. 1. Геометрия подводящих каналов: дискретизованная (а) и змеевидная (б) формы

Цель настоящего исследования состоит в том, чтобы предложить аналитическую трехмерную модель газового переноса в пористой среде с учетом конечных градиентов поля давлений и концентрации. Такая модель могла бы найти применение в исследованиях потоков кислорода к мембране катализатора ВТЭПЭ через подводящие газовые каналы ТЭПЭ змеевидной и дискретизованной конфигурации (рис. 1), так как генерируемый электрический ток пропорционален потоку реагентов к катализатору. Модель дает качественное описание поведения элемента в зависимости от физических характеристик газов и диффузора, конфигурации подводящих газ каналов, давления и концентрации реагентов в них, а также падения давления. Она демонстрирует пути уменьшения потерь переноса газа и улучшения показателей работы топливных элементов с полимерным электролитом на основе оптимизации физических и геометрических характеристик их электродов.

1. Математическая модель

Предположим, что газовая смесь в диффузоре ведет себя как идеальный газ, температурные градиенты несущественны, $T = \text{const}$, процессы стационарны, в объеме диффузора нет источников и стоков, а электрохимические реакции происходят только на поверхности каталитической мембраны (рис. 2). Тогда потоки газов A и B в объеме электрода подчиняются известному уравнению диффузии, уравнению непрерывности и уравнению потока Дарси [21, 22]:

$$\mathbf{I}_i = -\rho D_{i-j} \nabla c_A + g \rho_i \mathbf{u}, \quad \nabla \mathbf{I}_i = 0, \quad \mathbf{u} = -\frac{k}{\mu} \nabla p; \\ i = A, B, \quad j = B, A, \quad c_A + c_B = 1, \\ c_A = \rho_A / \rho, \quad c_B = \rho_B / \rho, \quad p = \rho R T,$$

где $\mathbf{I}_A, \mathbf{I}_B$ — потоки веществ A и B ; c_A, c_B — их концентрации; ρ_A, ρ_B — их плотности; ρ — полная плотность; p — давление; D_{A-B}, D_{B-A} — коэффициенты диффузии, $D_{A-B} = D_{B-A}$; \mathbf{u} — скорость движения газовой смеси как целого; R — газовая постоянная; T — температура; k — коэффициент проницаемости; μ — коэффициент вязкости.

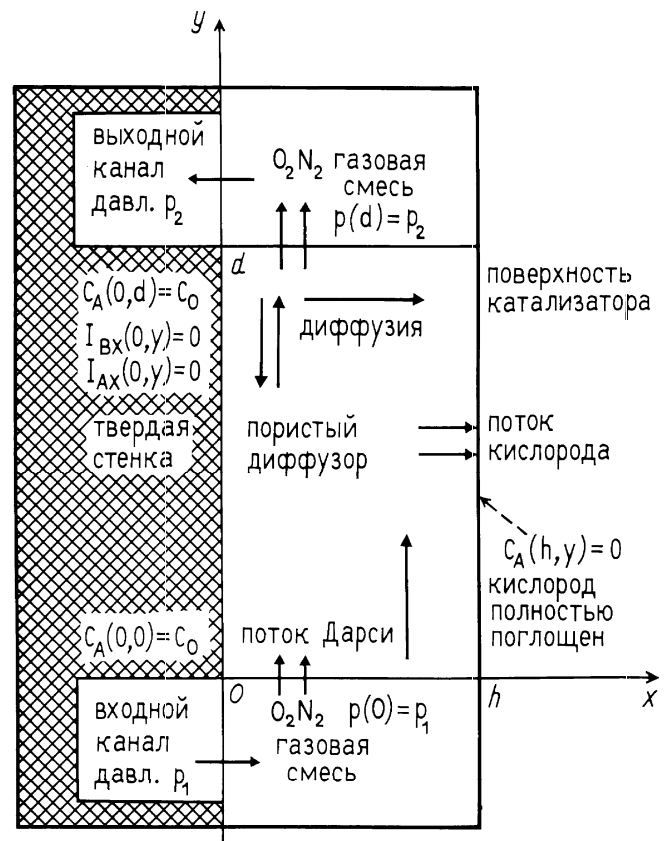


Рис. 2. Схема топливного элемента

Обычно давления газов на аноде и катоде ВТЭПЭ приблизительно равны друг другу. В этом случае оправдано предположение, что давление зависит только от одной координаты, $p = p(y)$, и не зависит от x . Для того чтобы учесть истощение потока газа A к мембране, например кислорода, с исходной

концентрацией c_0 , газ A предполагается полностью конвертированным на поверхности катализатора ВТЭПЭ. Граничные условия в таком случае имеют вид (рис. 2)

$$\begin{aligned} p(0) &= p_1, & p(d) &= p_2, \\ c_A(h, y) &= 0, & c_A(0, 0) &= c_0, & c_A(0, d) &= c_1, & (2) \\ I_{A,x}(x=0, y) &= 0, & I_{B,x}(x=0, y) &= 0. \end{aligned}$$

Коэффициенты диффузии D_{A-B} зависят от температуры, давления и состава газовой смеси. Однако при низких давлениях и постоянной температуре следующие комбинации переменных остаются постоянными [17]:

$$\alpha = \frac{pD_{A-B}}{RT} = \text{const}, \quad \beta = \frac{k}{\mu RT} = \text{const}. \quad (3)$$

Тогда приведенная система уравнений (1) с граничными условиями (2) допускает простое аналитическое решение для концентрации $c_A(x, y)$:

$$\begin{aligned} c_A(x, y) &= \cos Fx \left(E_1 \exp \frac{H-G}{2}y + E_2 \exp \frac{H+G}{2}y \right), \\ E_1 &= \frac{c_0 - c_1 \exp \left\{ -\frac{G+H}{2}d \right\}}{1 - \exp \{-Gd\}}, \\ E_2 &= \frac{-c_0 \exp \{-Gd\} + c_1 \exp \left\{ -\frac{G+H}{2}d \right\}}{1 - \exp \{-Gd\}}, \end{aligned} \quad (4)$$

$$G = \sqrt{4F^2 + H^2}, \quad F = \frac{\pi}{2h}, \quad H = -\frac{\beta}{\alpha} \frac{p_2^2 - p_1^2}{2d}.$$

Здесь p_1, p_2 — давления в двух точках двух рассматриваемых каналов, d — расстояние между этими точками, h — толщина слоя диффузора, c_0 — начальное значение концентрации газа A во

входном (т.е. *in*-) канале, c_1 — конечное значение концентрации газа A в выходном (т.е. *out*-) канале, α и β заданы формулой (3). Соответствующее распределение концентрации приведено на рис. 3, а, б.

Выражения (4) для концентрации дают распределение потока газа A (в случае кислорода оно приведено на рис. 3); при этом получаем следующий поток через мембрану:

$$\begin{aligned} J_A &= \int_0^d I_{Ax}(h, y) dy = \\ &= \alpha \frac{\pi}{h} \left(\frac{E_1}{H-G} \exp \frac{H-G}{2}y + \frac{E_2}{H+G} \exp \frac{H+G}{2}y \right). \end{aligned} \quad (5)$$

Соотношение между геометрическими пропорциями d/h , физическими параметрами α/β и $p_1^2 - p_2^2$, отвечающее максимуму потока реагента к мембране, является трансцендентным, несмотря на простоту выражения (5). Например, для потока кислорода $J[d]$ при $h = 0.1$ см, $k = 1.6 \cdot 10^{-7}$ см², $p_1 = 1$ атм, $p_2 = 0.98$ атм имеем $J[\{0.5, 1.0, 1.5, 2.0\} \text{ см}] = \{1.8 \cdot 10^{-4}, 2.1 \cdot 10^{-4}, 1.7 \cdot 10^{-4}, 1.4 \cdot 10^{-4}\}$ г/(см·с). Диффузор с проницаемостью $k \sim 10^{-7} \div 10^{-8}$ см² и $p_1 = 1$ атм, $\delta p = 0.02$ атм переносит кислород на мембрану наиболее эффективно, когда отношение $q = d/h$ лежит в пределах $q \sim 5 \div 10$.

Когда давление и его падение достаточно велики, т.е. $p_1^2 - p_2^2 \gtrsim 2\pi q(\alpha/\beta)$, поток Дарси доминирует над диффузией в направлении оси y . Асимптотика потока J_A при высоких значениях давления и его падения, т.е. при $p_1^2 - p_2^2 \gg q^2(\alpha/\beta)$, не зависит от давления и его падения, а также проницаемости, так как диффузор насыщен газом. При более низких давлениях, т.е. при $2\pi q(\alpha/\beta) < p_1^2 - p_2^2 < q^2(\alpha/\beta)$,

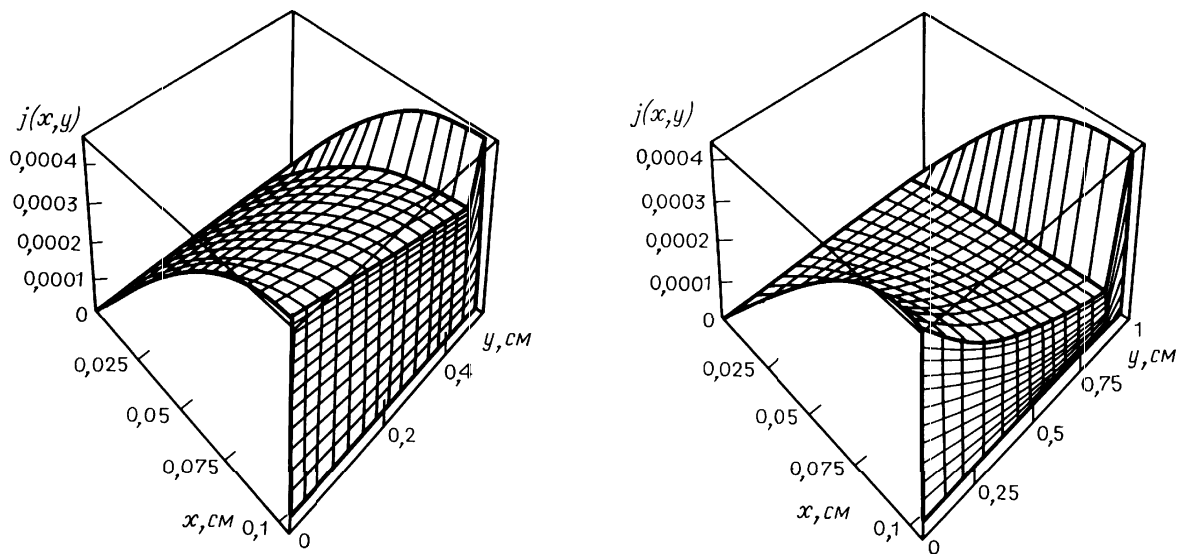


Рис. 3. Локальное распределение потока кислорода $j(x, y) = I_x(x, y)$ [г/(см²·с)] через азот в пористом диффузоре толщины 0.1 см с проницаемостью $k = 1.6 \cdot 10^{-7}$ см² с двумя каналами при давлении $p_1 = 1$ атм, $p_2 = 0.98$ атм, разнесенными на расстояние $d = 0.5$ см (слева), 1.0 см (справа). Поток кислорода J через линию $x = h$, соответствующую мембране, обозначен вертикальными линиями на правой стороне рисунков

поток J_A пропорционален $p_1^2 - p_2^2$, но не зависит от коэффициента диффузии. Заметим, что поток оказывается не зависящим от самих геометрических размеров d и h , а зависит лишь от их безразмерного отношения q . Когда $p_1^2 - p_2^2 \lesssim 2\pi q(\alpha/\beta)$, перенос кислорода к мембране осуществляется посредством диффузии. Соответствующая поверхность значений q приведена на рис. 4.

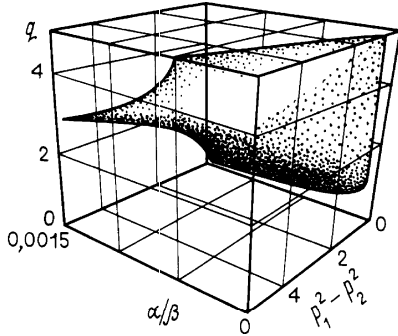


Рис. 4. Поверхность максимумов трехмерного потока, связывающая оптимальную высоту слоя диффузора при заданном расстоянии между каналами с физическими характеристиками газов и диффузора, а также давлением

2. Трехмерное обобщение модели

Предположим, что параметры d , $p_{1,2}$, $c_{0,i}$ более не являются постоянными, а зависят от переменной z :

$$\begin{aligned} d &= d(z), \quad c_0 = c_0(z), \quad c_1 = c_1(z), \\ p_1 &= p_1(z), \quad p_2 = p_2(z). \end{aligned} \quad (6)$$

В действительности длина подводющих газ каналов L в ВТЭПЭ превышает расстояние между ними d и толщину диффузора h (рис. 1, 2): $L \gg d$, $L \gg h$. Тогда следующие соотношения $\partial p/\partial y \gg \partial p/\partial z$, $\nabla p \parallel \mathbf{y}$ справедливы всюду в замкнутой сети каналов, за исключением окрестности точек поворота непрерывной сети каналов. Вклад последних мал относительно всей сети, в частности, из-за малого падения давления в окрестности точек поворота. Следовательно, потоки газов в диффузоре вдоль подводющих каналов пренебрежимо малы по сравнению с потоками газа поперек диффузора. Поток кислорода через диффузор над двумя соседними каналами к мембране в точке $x = h$ равен

$$\begin{aligned} \Omega &= \alpha \frac{\pi}{h} \int dz \left(\frac{E_1(z)}{H(z) - G(z)} \exp \frac{H(z) - G(z)}{2} y + \right. \\ &\quad \left. + \frac{E_2(z)}{H(z) + G(z)} \exp \frac{H(z) + G(z)}{2} y \right), \end{aligned} \quad (7)$$

где E_1, E_2, G, H, F заданы выражениями (4) с учетом (6); $p_1(z), c_0(z)$ — соответственно давление и концентрация кислорода на входе в канал, $p_2(z), c_1(z)$ — соответственно давление и концентрация кислорода на выходе из канала, α и β — константы, заданные формулами (3).

3. Два частных случая конфигураций электродов

Рассмотрим перенос кислорода к мембране для двух различных конфигураций параллельных друг другу и эквидистантных каналов в электроде, т. е. для сети каналов так называемой дискретизованной конструкции (рис. 1, а) и непрерывной формы (рис. 1, б).

а) Дискретизованная конструкция

Дискретизованная конструкция (рис. 1, а) включает в себя только два типа отдельных каналов: входные, т. е. *in*-каналы, и выходные, т. е. *out*-каналы. Предположим, что концентрация газа A вдоль каналов поддерживается постоянной и равной значениям c_0 и c_1 (вообще говоря, кислород истощается вдоль каналов, если его поток не поддерживается специально, так что средние значения $c_{0,i}$ могут быть ниже, чем концентрация $c_{0,1}$). В таком случае поток реагента к мембране через диффузор толщины L над сетью дискретизованных каналов записывается следующим образом:

$$\begin{aligned} \Omega_{\text{int dig}} &= (n - 1) \pi \alpha \frac{L}{h} \times \\ &\times \left(\frac{E_1}{H - G} \exp \frac{H - G}{2} y + \frac{E_2}{H + G} \exp \frac{H + G}{2} y \right), \end{aligned} \quad (8)$$

где E_1, E_2, G, H, F заданы формулами (4); α, β заданы в (5); $d = M/(n - 1)$, n — число каналов; M — ширина секции с каналами; L — длина одиночного канала; p_1, p_2 — значения давления на входе и выходе соответственно; остальные обозначения те же, что и в (4). Анализ потока кислорода через мембрану Ω , показанного на рис. 5, приводит к выводу о существовании области насыщения диффузора кислородом при больших $p\Delta p$, когда дальнейшее увеличение потока, вызванного градиентом давления, более не способствует увеличению потока через мембрану. Насыщенный поток кислорода через мембрану оказывается почти полностью независимым от числа каналов. С увеличением этого числа диффузия и, следовательно, перенос кислорода при низких давлениях становятся эффективнее, а давление, при котором наступает насыщение, уменьшается. Например, ненасыщенный поток кислорода к мембране для секции с 21 каналом приблизительно в 5 раз выше, чем для секции с 6 каналами.

Чем выше проницаемость, тем меньшие значения $p_1^2 - p_2^2$ необходимы для насыщения диффузора кислородом. Например, диффузор толщиной 1 мм с $k = 8 \cdot 10^{-8}$ см² над слоем с секцией из 21 дискретизованного канала насыщается кислородом, когда $p \gtrsim 1$ атм, $\Delta p \gtrsim 0.1$ атм.

Зависимость потока кислорода $\Omega(h)$ нетривиальна. Большие значения $p\Delta p$ и проницаемости для газа k уменьшают оптимальную для переноса кис-

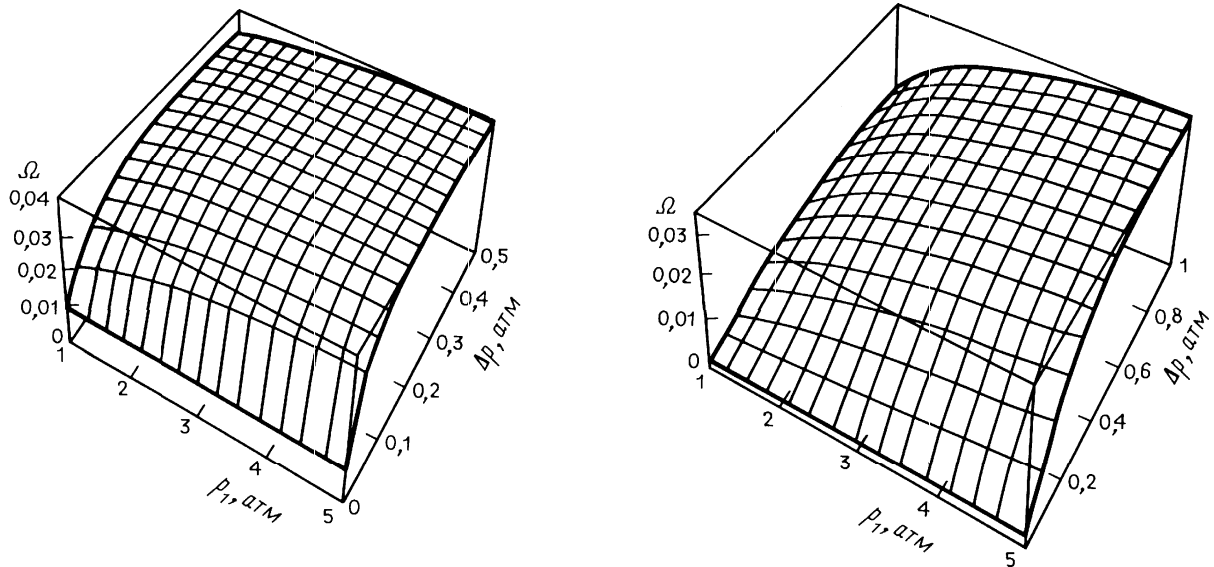


Рис. 5. Потoki кислорода через плоскость мембраны $x = h$ в случаях секций с 21 (слева) и 6 (справа) дискретизованными каналами и с диффузором толщиной 1 мм и проницаемостью $k = 1.6 \cdot 10^{-8}$ см² в режиме полной редукции кислорода на мембране при входном давлении p_1 и падении давления Δp

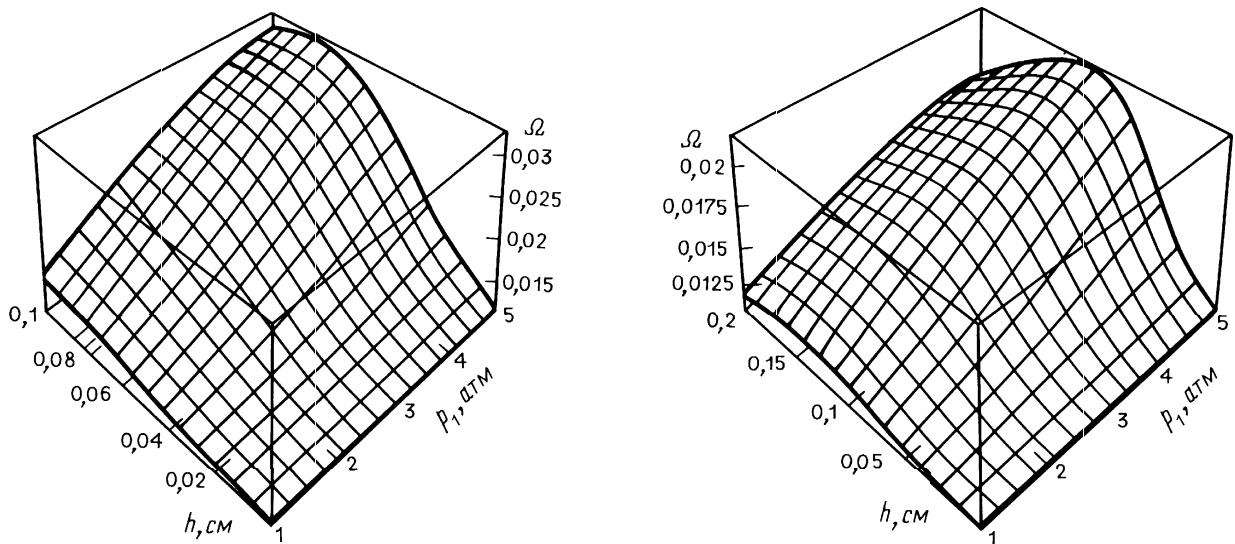


Рис. 6. Потoki кислорода через плоскость мембраны $x = h$ по секциям с 21 дискретизованным каналом и диффузором с проницаемостью $k = 1.6 \cdot 10^{-8}$ см² в режиме полной редукции кислорода на мембране при толщине диффузора h и входном давлении p_1 . Падение давления $\delta p = 0.02$ атм (слева) и 0.2 атм (справа)

лорода толщину диффузора. Например, диффузор с $k = 8 \cdot 10^{-8}$ см² с сетью с 21 дискретизованным каналом при $p_1 \gtrsim 1$, $\delta p = 0.5$ атм наиболее эффективен при $h \sim 100$ мкм. Пример зависимости потока кислорода Ω от h и p_1 показан на рис. 6.

б) Змеевидная конструкция (непрерывный канал)

Падение давления и изменение концентрации между двумя соседними подводящими газ каналами в таком ВТЭПЭ (рис. 1, б) обычно достаточно малы. Используя выражение (7) в случае пластины со змеевидными каналами, получаем полный поток реагента через плоскость каталитической мембраны:

$$\Omega_{\text{serp}} = \pi \alpha \frac{L}{h} \sum_{i=1}^{n-1} \left(\frac{E_{1i}}{H_i - G_i} \exp \frac{H_i - G_i}{2} y + \frac{E_{2i}}{H_i + G_i} \exp \frac{H_i + G_i}{2} y \right),$$

$$E_{1i} = \frac{c_{0i} - c_{1i} \exp \left\{ -\frac{G_i + H_i}{2} d \right\}}{1 - \exp \{-G_i d\}},$$

$$E_{2i} = \frac{-c_{0i} \exp \{-G_i d\} + c_{1i} \exp \left\{ -\frac{G_i + H_i}{2} d \right\}}{1 - \exp \{-G_i d\}},$$

$$G_i = \sqrt{4F^2 + H_i^2}, \quad F = \frac{\pi}{2h}, \quad H_i = -\frac{\beta p_{2i}^2 - p_{1i}^2}{\alpha 2d},$$

(9)

где L — длина одной секции змеевидного канала; $p_{2i}, p_{1i}, c_{0i}, c_{1i}$ — средние значения соответствующих величин в каждом канале, а другие обозначения такие же, как и в (8). Ввиду малости падений давления и концентрации простая линеаризация проводится следующим образом:

$$p_{1i} = p_{in} + (i - 1/2) \delta p, \quad \delta p = \frac{p_{out} - p_{in}}{n - 1}, \quad d = \frac{M}{(n - 1)}, \quad (10)$$

$$c_{0i} = c_{0in} + (i - 1/2) \delta c_0, \quad \delta c_0 = \frac{c_{0out} - c_{0in}}{n - 1}, \quad (11)$$

$$c_{1i} = c_{0i} - \delta c_0,$$

где p_{out} — давление газа на выходе, p_{in} — давление

газа на входе, c_{0out} — концентрация реагентов на выходе, c_{0in} — концентрация реагентов на входе, n — число подводящих каналов, h — толщина слоя диффузора, d — расстояние между соседними каналами, M — ширина пластины с каналами. Потоки кислорода через плоскость мембраны $x = h$ для случаев секций с 21 и 6 змеевидными каналами проиллюстрированы на рис. 7 и 8.

В режиме полной конверсии кислорода в воду в результате электрохимической реакции на мембране, рассмотренном в настоящей работе, поток при переносе кислорода к мембране по змеевидным каналам Ω_{serp} качественно ведет себя подобно потоку кислорода $\Omega_{int dig}$ в случае дискретизованной сети.

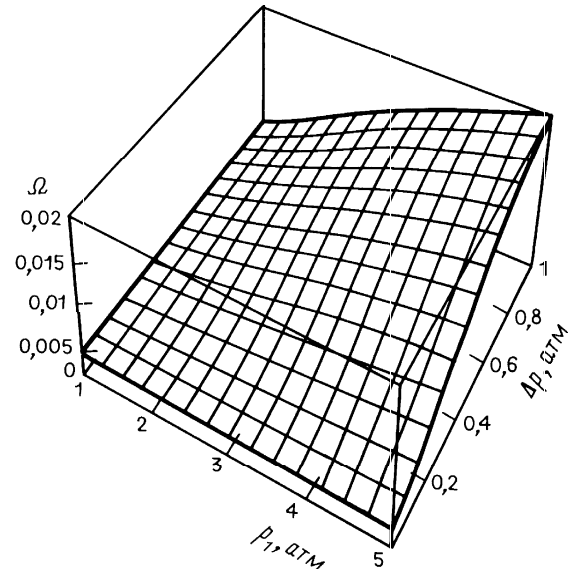
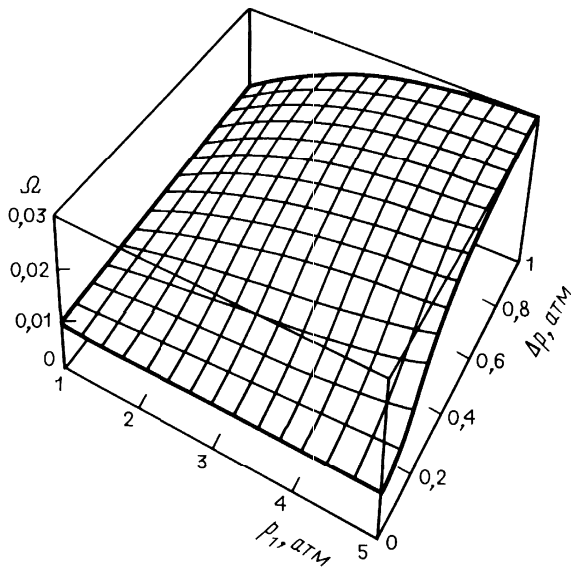


Рис. 7. Потоки кислорода через плоскость мембраны $x = h$ для случаев секций с 21 (слева) и 6 (справа) змеевидными каналами и диффузором толщиной 1 мм с проницаемостью $k = 1.6 \cdot 10^{-8} \text{ см}^2$ в режиме полной конверсии кислорода на мембране при входном давлении p_1 и падении давления Δp

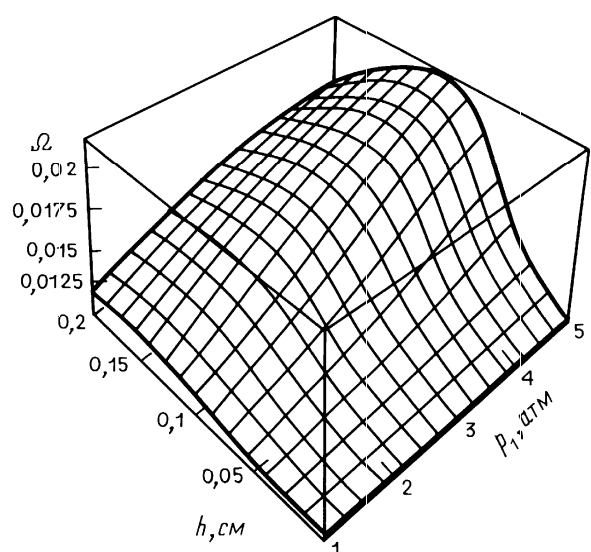
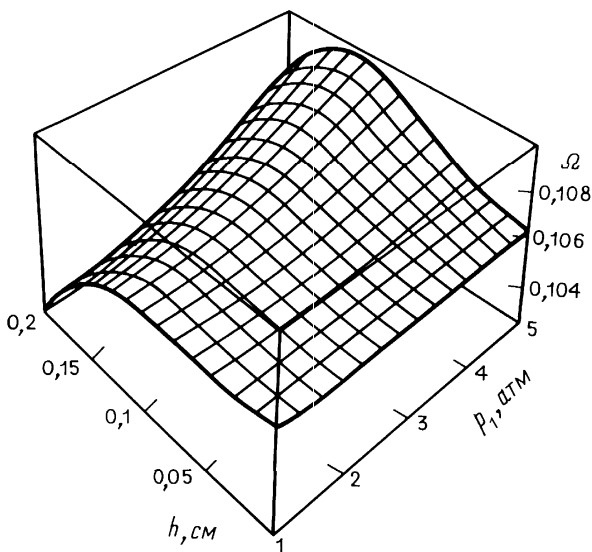


Рис. 8. Потоки кислорода через плоскость мембраны $x = h$ для случая секции с 21 змеевидным каналом и диффузором с проницаемостью $k = 1.6 \cdot 10^{-8} \text{ см}^2$ в режиме полной конверсии кислорода на мембране при толщине диффузора h и входном давлении p_1 . Значения падения давления $\delta p = 0.02 \text{ атм}$ (слева) и 0.2 атм (справа)

Однако Ω_{serp} определяется диффузией в гораздо более широкой области низких значений $p\Delta p$, где остается ненасыщенным. Например, в случае диффузора с низкой проницаемостью ($k = 1.6 \cdot 10^{-9} \text{ см}^2$) $h = 250 \text{ мкм}$, $n = 41$, Ω_{serp} определяется диффузией и не зависит от давления при $p < 5 \text{ атм}$, $\Delta p < 1 \text{ атм}$. С ростом величины произведения $p\Delta p$ насыщение кислородного потока в змеевидной модели наступает медленнее, чем в случае дискретизованной конструкции при тех же условиях; например, когда $n = 21$, $h = 1 \text{ мм}$, $k = 8 \cdot 10^{-8} \text{ см}^2$, Ω_{serp} насыщается при $p > 1.5 \text{ атм}$, $\Delta p > 0.4 \text{ атм}$. Диффузор с большой проницаемостью ($k = 8 \cdot 10^{-8} \text{ см}^2$) над 41 дискретизованным каналом с давлениями $p_1 \gtrsim 1 \text{ атм}$, $\delta p = 0.5 \text{ атм}$, обеспечивает наиболее эффективный перенос кислорода при $h \sim 250 \text{ мкм}$.

Выводы

Результаты работы получены на основе развитой модели для переноса смеси газов в поле конечного градиента давления и концентрации в пористой среде. Модель применяется для описания переноса кислорода в пористых диффузорах ВТЭПЭ. Анализ полученных результатов приводит к следующим выводам.

Поток кислорода в диффузоре возрастает на пути к мембране ($x = h$), где он достигает максимального значения, в то время как концентрация кислорода убывает до нуля. Трансцендентное соотношение между толщиной диффузора, режимом давления и физическими характеристиками газов и диффузора, обеспечивающее максимальный поток реагента через мембрану, получено в виде трехмерных поверхностей. При низких значениях давления $p_1^2 - p_2^2$ и газовой проницаемости диффузора k перенос кислорода к мембране ухудшается, поскольку он осуществляется только за счет диффузии.

Продемонстрировано возникновение эффекта насыщения кислородного потока в диффузионном слое при больших $p\Delta p$, когда дальнейшее увеличение давления и величины его падения более не приводит к росту потока кислорода через мембрану. Поток кислорода через мембрану в области «насыщения» не зависит ни от числа каналов в подводящем слое, ни от проницаемости и представляет собой почти линейную функцию коэффициента диффузии, т. е. $\Omega = \Omega(\alpha) \sim \alpha$.

Эффект насыщения наиболее заметен в материалах с высокой газовой проницаемостью. В случае низкой проницаемости диффузионного слоя насыщение наступает медленно, особенно в змеевидной модели. Увеличение ненасыщенного потока кислорода через мембрану может быть достигнуто за счет большего числа подводящих газ каналов.

Высокие значения $p\Delta p$ и проницаемости k уменьшают оптимальную для переноса кислорода к мембране толщину диффузора.

Сравнение змеевидной и дискретизованной моделей в режиме полной редукации кислорода на мембране, рассмотренном выше, приводит к следующим выводам.

1. Для низких значений $p\Delta p$ змеевидная модель предсказывает те же значения потока кислорода через мембрану, что и дискретизованная модель, при условии, что концентрация остается постоянной вдоль входных дискретизованных каналов. Однако в действительности кислород истощается в дискретизованных каналах, при этом и его концентрация на выходе низка, и, следовательно, показатели змеевидной конструкции оказываются выше, чем у дискретизованной конструкции при низких давлениях.

2. С ростом $p\Delta p$ значения потока кислорода через мембрану ВТЭПЭ становятся несколько ниже для змеевидной модели, поскольку насыщение в ней наступает медленнее и Ω возникает только за счет диффузии в гораздо более широком диапазоне $p\Delta p$. Однако это различие уменьшается с ростом $p\Delta p$.

В заключение следует заметить, что полученное решение является частным и соответствует выбранным начальным условиям, которые заданы не в самом общем виде, поэтому его можно рассматривать лишь как первое приближение. Более полное исследование задачи требует отдельного рассмотрения.

Литература

1. Wilson M.S., Gottesfeld S. // J. Electrochem. Soc. 1992. **139**, No 2. L28.
2. Taylor E.J., Anderson E.B., Vilambi N.R.K. // J. Electrochem. Soc. 1992. **139**, No. 5. L45.
3. Sasikumar G., Raja M., Parthasarathy S. // Electrochim. Acta. 1995. **40**. P. 285.
4. Ralph T.R., Hards G.A., Keating J.E. et al. // J. Electrochem. Soc. 1997. **144**, No. 11. P. 3845.
5. Nguyen T.V., White R.E. // J. Electrochem. Soc. 1993. **140**, No. 8. P. 2178.
6. Colde J.A., Bahar B., Wilson M.S. et al. // The Electrochemical Society Proceedings Series. Proton Conducting Membrane Fuel Cell I, PV 95-23 / Eds. S. Gottesfeld, G. Halpert, A. Landgrebe. N.Y., 1995. P. 193.
7. Wnek G.E., Rider J.N., Serpico J.M. et al. // Ibid. P. 247.
8. Wainright J.S., Wang J.-T., Weng D. et al. // J. Electrochem. Soc. 1995. **142**, No. 7. L121.
9. Watanabe M., Satoh Y., Shimura C. // J. Electrochem. Soc. 1993. **140**, No. 11. P. 3190.
10. Springer T.E., Zawodzinski T.A., Gottesfeld S. // J. Electrochem. Soc. 1991. **138**, No. 8. P. 2334.
11. Perry M.L., Newman J., Cairns E.J. // J. Electrochem. Soc. 1998. **145**, No. 1. P. 5.
12. Bernardi D.M., Verbrugge M.W. // AIChE J. 1991. **37**, No. 8. P. 1151.
13. Rho Y.W., Srinivasan S., Kho Y.T. // J. Electrochem. Soc. 1998. **141**, No. 8. P. 2089.
14. Bernardi D.M. // J. Electrochem. Soc. 1990. **137**, No. 11. P. 3344.
15. Fuller T.F., Newman J. // J. Electrochem. Soc. 1993. **140**, No. 5. P. 1218.

16. *Amphlett J.C., Baumert R.M., Mann R.F.* et al. // J. Electrochem. Soc. 1995. **142**, No. 1. P. 1.
17. *Gurau V., Barbir F., Liu H.* // J. Electrochem. Soc. 2000. **147**, No. 7. P. 2468.
18. *Wilson M.S., Springer T.E., Davey J.R., Gottesfeld S.* The Electrochemical Society Proceedings Series. Proton Conducting Membrane Fuel Cell I, PV 95-23 / Eds. S. Gottesfeld, G. Halpert, A. Landgrebe. N.Y., 1995. P. 115.
19. *Nguyen T.V.* // J. Electrochem. Soc. 1996. **143**, No. 5. L103.
20. *Yi J.S., Nguyen T.V.* // J. Electrochem. Soc. 1998. **145**. 1149.
21. *White F.M.* Viscous Fluid Flow. N.Y., 1991.
22. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Гидродинамика. М.: Наука, 1986.

Поступила в редакцию
13.06.02