
ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ МИКРОПОРИСТОГО СТЕКЛА НА ЕГО СТРУКТУРНЫЕ И ЭЛЕКТРОПОВЕРХНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

© 2022 г. А. С. Кузнецова^{1, 2, *}, Л. Э. Ермакова¹, И. Н. Анфимова², Т. В. Антропова²

¹Санкт-Петербургский государственный университет,
Университетская наб., 7/9, Санкт-Петербург, 199034 Россия

²Институт химии силикатов им. И.В. Гребенщикова РАН,
наб. Макарова, 2, Санкт-Петербург, 199034 Россия

*e-mail: a_kuznetsova95@mail.ru

Поступила в редакцию 09.12.2021 г.

После доработки 18.01.2022 г.

Принята к публикации 07.02.2022 г.

Проведено исследование структурных характеристик, удельной электропроводности, чисел переноса противоположно заряженных ионов и электрокинетического потенциала микропористого стекла, подвергнутого дополнительной термообработке при 750°C (МИП-750), в 0.1–0.0001 М растворах NaCl. Полученные результаты сопоставлены со свойствами микро- и макропористых стекол, приготовленных по стандартным методикам. Обнаружено, что с ростом размеров порового пространства в ряду МИП < МИП-750 < МАП абсолютные величины электрокинетического потенциала возрастают.

Ключевые слова: пористое стекло, удельная поверхность, коэффициент структурного сопротивления, коэффициент эффективности, число переноса, электрокинетический потенциал

DOI: 10.31857/S0132665122030052

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия наблюдается растущий интерес к материалам, структурные элементы которых имеют нанометровый размер. Важность наносистем состоит в том, что при доминирующей роли поверхности раздела фаз, они обладают уникальными физико-химическими свойствами, отличными от таковых характеристик в объемной фазе вещества [1]. Представителями одного из типов таких наноструктурированных материалов являются мембраны со сквозными мезопорами (канальные наноструктуры), изготовленные из двухфазного натриевоборосиликатного стекла (пористые стекла – ПС) [2]. Мембраны на основе ПС могут быть получены с заданными величинами размера пор от 0.3 до 1000 нм и удельной поверхности до 1000 м²/г путем варьирования исходного химического состава, температуры и времени термообработки [3–5]. Такие ПС мембраны не подвержены воздействию микроорганизмов, могут быть стерилизованы, обладают жесткой структурой, большой сорбционной емкостью и экологически безопасны. Следует отметить, что стеклообразные пористые мембраны интересны и с точки зрения развития фундаментальных представлений коллоидной химии, поскольку могут быть использованы в качестве модельных систем для изучения влияния дисперсности на электрокинетические характеристики на границе раздела твердое тело–электролит [6, 7]. В настоящей работе были получены ПС мембраны с различными

ми структурными характеристиками и состоянием поверхности путем дополнительной термической обработки и химического травления [2, 8, 9].

Проблема изучения механизма формирования двойного электрического слоя в коллоидных системах и определения их поверхностного заряда является одной из основных для фундаментального развития теории электроповерхностных явлений. С точки зрения практического применения, понимание явлений, возникающих при переносе ионов по каналам нанометрового размера в капиллярах или пористых средах, необходимо для развития микро- и нанофлюидных систем [10, 11], преобразования энергии [12–14] и разделения жидких сред [15, 16]. Решение этих вопросов, в том числе, связано с исследованием электрокинетического потенциала и ионного транспорта через заряженные канальные наноструктуры под действием градиента давлений.

В связи с этим, целью работы было проведение исследования и сопоставления транспортных свойств силикатных пористых мембран с различными структурными параметрами порового пространства в $0.1\text{--}10^{-4}$ М растворах бинарного симметричного 1 : 1-зарядного электролита NaCl.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В качестве объектов исследования были выбраны ПС, полученные из двухфазного стекла 8В-НТ состава (по синтезу, мол. %): $8\text{Na}_2\text{O}\cdot 22\text{B}_2\text{O}_3\cdot 70\text{SiO}_2$ [17]. Для получения микропористых стекол (МИП [18]) двухфазные стекла (диски диаметром 30 мм и толщиной около 1 мм) выщелачивали в 3 М растворе азотной или соляной кислоты, отмывали дистиллированной водой и высушивали при 120°C . Макропористое (МАП [18]) стекло, полученное путем обработки МИП образца 0.5 М раствором КОН при 20°C в течение 4 ч, также отмывали дистиллированной водой и сушили при 120°C в течение 1 ч. Часть микропористых образцов после их получения были подвергнуты дополнительной термообработке при 750°C в течение 1 ч. Образцы ПС маркированы в соответствии с условиями их получения. Растворы, использовавшиеся при проведении измерений, готовили на деионизованной воде с удельной электропроводностью не выше 1.5×10^{-6} Ом $^{-1}$ см $^{-1}$ (система очистки воды Аквалаб AL Plus) с использованием стандарт-титра (0.1 М HCl) и реактива марки “осч” (NaCl).

Изучение пористой структуры термообработанного микропористого стекла было проведено с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ, Scanning Electron Microscope Zeiss Merlin). Измерения структурных параметров ПС включали также нахождение объемной пористости сразу после их получения ($W_{\text{исх}}$). Величины $W_{\text{исх}}$ определяли весовым методом [19]. Высушенные при 120°C до постоянной массы ($M_{\text{сух}}$) мембраны взвешивали, затем пропитывали деионизованной водой и снова взвешивали, находя массу влагонасыщенной мембраны ($M_{\text{вл}}$). Избыток воды с поверхности мембраны удаляли с помощью фильтровальной бумаги. Величины $W_{\text{исх}}$ рассчитывали по уравнению

$$W_{\text{исх}} = \frac{(M_{\text{вл}} - M_{\text{сух}})}{(M_{\text{вл}} - M_{\text{сух}}) + (M_{\text{сух}}\rho_{\text{H}_2\text{O}}/\rho_{\text{с}})}, \quad (1)$$

где $\rho_{\text{H}_2\text{O}}$ – плотность воды. Определение массы образцов проводили на весах Mettler Toledo Al 204. Погрешность определения значений объемной пористости не превышала $\pm 2\%$.

После измерений объемной пористости образцы приводили в равновесие с 0.1 М раствором соляной кислоты и измеряли удельную электропроводность ПС $\kappa_{\text{М}}$ разностным методом [19, 20] при 20°C (термостат LOIP – LT-111). В концентрированных ($C \geq 0.1$ М) растворах электролитов вкладом ионов двойного электрического слоя в электропроводность поровой жидкости слабозаряженных мембран, к которым отно-

сятся пористые стекла, можно пренебречь [19], поэтому из экспериментальной величины κ_M можно найти коэффициент структурного сопротивления β , равный отношению сопротивления мембраны к сопротивлению эквивалентного ей по толщине и площади слоя раствора равновесного электролита. Значения коэффициентов структурного сопротивления были рассчитаны по формуле

$$\beta = \kappa_V / \kappa_M, \quad (2)$$

где κ_V – удельная электропроводность электролита. Измерения электропроводности растворов и мембран проводили с помощью измерителя иммитанса E7-21 на частоте 1 кГц. Погрешность определения величин β составляла $\pm(2-5)\%$.

Коэффициенты структурного сопротивления мембран были также найдены из последующих измерений удельной электропроводности мембран в 0.1 М растворе хлорида натрия. Для этого образцы ПС, находившиеся в децимолярном растворе кислоты, споласкивали деионизованной водой и помещали в 0.1 М раствор хлорида натрия на несколько суток для приведения в состояние равновесия, после чего проводили измерения электропроводности мембран и расчет значений β . После этих измерений проводили определение удельной электропроводности в более разбавленных (10^{-2} – 10^{-4} М) растворах NaCl. С каждым из растворов ПС контактировали не менее двух суток. По окончании измерений транспортных характеристик ПС снова определяли коэффициенты структурного сопротивления в децимолярных растворах NaCl и HCl. Затем отмытые от кислоты (деионизованная вода, контроль по pH и удельной электропроводности) образцы ПС взвешивали во влажном и высушенном до постоянной массы состояниях для нахождения конечных значений объемной пористости $W_{\text{кон}}$.

Высушенные образцы ПС после взвешивания растирали в агатовой ступке и для полученных порошков находили величины удельных поверхностей $S_{0 \text{ кон}}$ (методом БЭТ по тепловой десорбции азота с хроматографической регистрацией, погрешность метода $\pm 1-2 \text{ м}^2/\text{г}$). Начальные значения удельных поверхностей $S_{0 \text{ исх}}$, соответствующие состоянию образцов ПС до контакта с 0.1 М раствором соляной кислоты, были найдены для порошков ПС, полученных из параллельных образцов мембран.

Найденные экспериментально структурные параметры ПС использовали для расчета средних радиусов пор r_{S_0} и коэффициентов извилистости поровых каналов K (отношение длины поры к толщине мембраны). Если рассматривать поровое пространство в рамках модели цилиндрических капилляров, расположенных под углом к поверхности мембраны, то, пренебрегая вкладом внешней поверхности пористых частиц в величину удельной поверхности, получим [17]:

$$r_{S_0} = \frac{2W}{(1-W)\rho_S S_0}. \quad (3)$$

В рамках этой модели величина K может быть найдена по следующему уравнению [17]:

$$K^2 = \beta W. \quad (4)$$

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты определения структурных параметров исследованных ПС представлены на рис. 1 и в табл. 1. Анализ СЭМ изображений поверхности образцов 8В-НТ (3 М HNO₃) МИП-750 (пример такого изображения приведен на рис. 1а) показал, что характер пористой поверхности ПС после дополнительной термообработки практически не отличается от такового для мембран, полученных по стандартным методикам [20]. Результаты измерений объемной пористости ПС показывают (табл. 1), что термическая обработка ПС при 750°C приводит к уменьшению величин $W_{\text{исх}}$ для обоих

Таблица 1. Структурные параметры пористых стекол

Мембрана, электролит	d_M , см	$W_{исх}$	$W_{кон}$	$K_{исх}$	$K_{кон}$	$S_{0\text{ исх}}$, м ² /г	$r_{S_0,исх}$, нм	$S_{0\text{ кон}}$, м ² /г	$r_{S_0,кон}$, нм
8В-НТ (3 М НСl) МИП, NaCl	0.095	0.24	0.28	2.59	2.41	219	1.3	153.5	2.3
8В-НТ (3 М ННО ₃) МИП-750-1, NaCl	0.095	0.22	0.23	2.21	2.14	110	2.4	90	3.1
8В-НТ (3 М ННО ₃) МИП-750-2, NaCl	0.096	0.21	0.22	2.26	2.18				
8В-НТ (3 М ННО ₃ , 0.5 М КОН) МАП, NaCl	0.099	0.51	0.52	1.29	1.27	48.5	19.7	50	20.2

исследованных параллельных образцов, по-видимому, вследствие исчезновения самых тонких пор. Видно также, что как для образца 8В-НТ (3 М НСl) МИП, так и для ПС 8В-НТ (3 М ННО₃) МИП-750, длительный контакт с растворами электролитов приводит к увеличению объемной пористости и снижению коэффициента извилистости, что связано с выходом части вторичного кремнезема из порового пространства. Для стандартного образца, не подвергавшегося термической обработке, увеличение значения W при длительном контакте с растворами электролитов происходит на 17% от исходной величины, а величина K снизилась на 8% от исходного значения. Для образцов ПС, подвергавшихся дополнительной термообработке, изменения структурных параметров во времени существенно меньше – для объемной пористости они составляют 5%, коэффициенты извилистости для ПС, термообработанных при 750°C, снижаются на 1–4%. Изменения морфологии порового пространства исследованных ПС при контакте с электролитом приводят и к уменьшению удельной поверхности, также наиболее выраженному (почти на 30% от исходной величины) для базового микропористого стекла. Для макропористого стекла характер изменений структурных параметров во времени аналогичен таковому для МИП образцов, но сами изменения незначительны (табл. 1) и связаны с процессами растворения кремнеземного каркаса.

Результаты измерений коэффициентов структурного сопротивления для ПС 8В-НТ (3М НСl) МИП в растворах соляной кислоты и хлорида натрия показывают (рис. 1б), что наблюдается монотонное снижение величин β во времени более чем на 30% от начального значения, что согласуется с результатами, полученными ранее для аналогичных ПС [20]. Термообработка ПС при 750°C привела как к некоторому уменьшению начальных значений коэффициентов структурного сопротивления, так и к существенному, не наблюдавшемуся ранее, изменению характера зависимости $\beta-t$: на начальном участке величины β возрастают при переходе от 0.1 М раствора НСl к 0.1 М раствору NaCl. По-видимому, нахождение в растворе соли в течение 3 сут привело к частичному набуханию спеченного при термообработке вторичного кремнезема. Дальнейший контакт с растворами электролитов для обоих термообработанных образцов приводит к снижению коэффициентов структурного сопротивления на 14–17%, связанному с растворением набухшего вторичного кремнезема и его выходом из порового пространства. Коэффициенты структурного сопротивления для термообработанных образцов примерно в 2 раза меньше, чем для полученного по стандартной методике. Отметим также, что коэффициенты структурного сопротивления образцов 8В-НТ (3 М ННО₃) МИП-750 остаются гораздо большими, чем величины β для макропористого стекла 8В-НТ (3 М ННО₃, 0.5 М КОН) МАП. Коэффициент структурного сопротивления МАП образца не зависит от химического состава раствора и остается во времени практически постоянным.

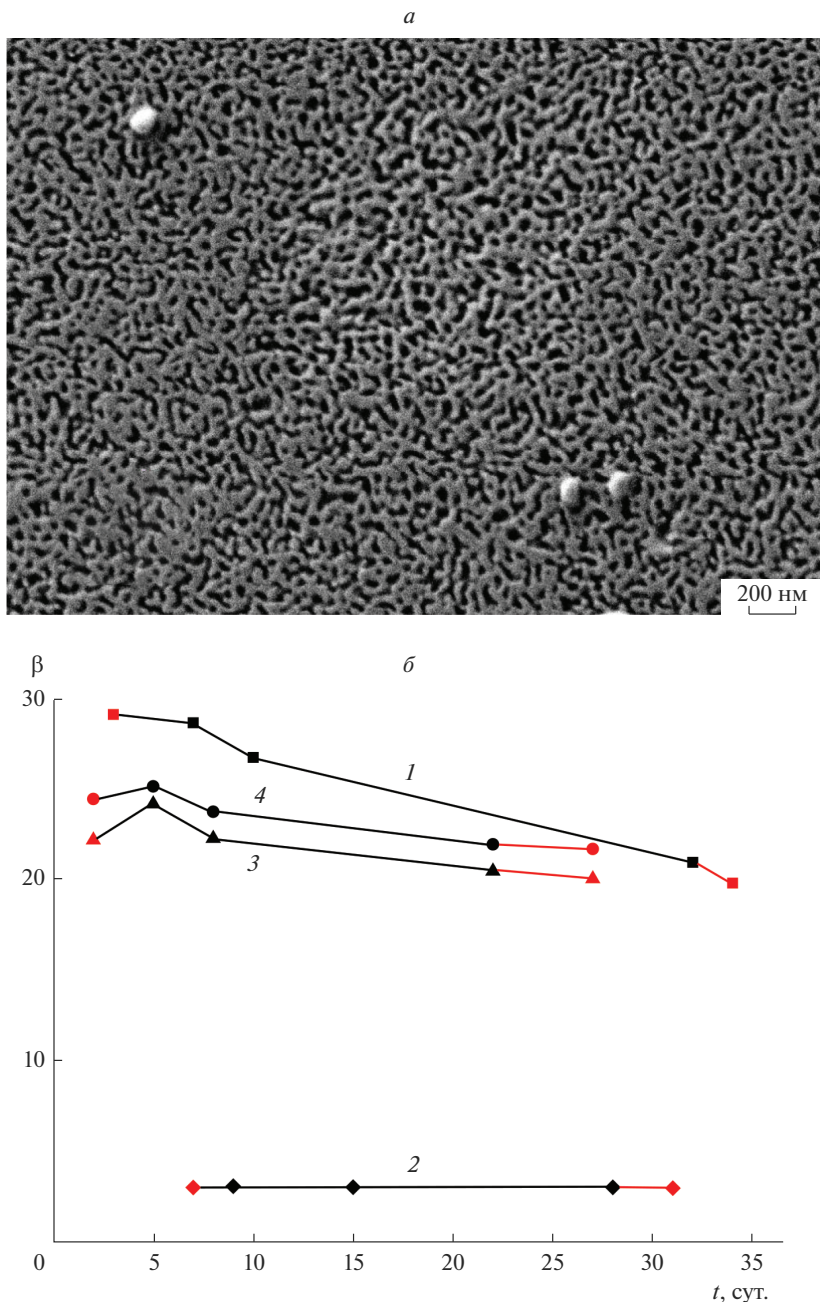


Рис. 1. СЭМ изображение поверхности образца 8В-НТ (3 М HNO_3) МИП-750 (*a*). Зависимости коэффициентов структурного сопротивления от времени контакта с растворами электролитов. 1 – 8В-НТ (3М HCl) МИП; 2 – 8В-НТ (3 М HNO_3 , 0.5 М KOH) МАП, 3 – 8В-НТ (3 М HNO_3) МИП-750-1; 4 – 8В-НТ (3 М HNO_3) МИП-750-2. Красные точки относятся к измерениям в 0.1 М растворе HCl , черные точки соответствуют измерениям в 0.1 М растворе NaCl . Красные участки зависимостей означают нахождение ПС в растворе кислоты, черные – в растворах хлорида натрия (*б*).

Расчет средних радиусов пор ПС из величин удельных поверхностей показывает, что термообработка при 750°C приводит к росту значения r_{s_0} от 1.3 до 2.4 нм, а нахождение в растворах хлорида натрия в течение трех недель приводит к дальнейшему увеличению средних радиусов пор до 2.3 и 3.1 нм для базового и термообработанного образцов соответственно. Средний радиус пор мембраны 8В-НТ (3 М HNO_3 , 0.5 М КОН) МАП, рассчитанный из удельной поверхности, оказался несколько большим, чем величина среднего радиуса пор, найденного из измерений коэффициента фильтрации [17] и равного 16.4 нм. Это различие обычно связывают с тем, что метод фильтрации, в отличие от измерений удельной поверхности пористых частиц, позволяет определить размеры только сквозных пор и не учитывает наличие тупиковых пор.

Коэффициенты эффективности α , равные отношению электропроводностей порового (κ) и равновесного свободного раствора, были рассчитаны по уравнению [19]

$$\kappa = \kappa_V \alpha = \kappa_M \beta. \quad (5)$$

Результаты определения коэффициентов эффективности (рис. 2а) показали, что для ПС, термообработанных при 750°C, при концентрациях раствора $\text{NaCl} > 0.0005$ М значения α практически совпадают с величинами для базового МИП стекла, а в самых разбавленных растворах становятся несколько меньше. Проведенные ранее исследования [6] показали, что для силикатных стекол в нейтральной области рН термообработка при температуре 750°C приводит к небольшому росту абсолютной величины поверхностного заряда $|\sigma_0|$, поскольку снижение значений $|\sigma_0|$ за счет частичной дегидроксидации поверхности компенсируется их ростом за счет увеличения размера поровых каналов. Поэтому причиной наблюдаемых соотношений коэффициентов эффективности базового и термообработанных образцов является влияние двух противоположно действующих факторов: величины α растут при уменьшении количества вторичного кремнезема в порах вследствие увеличения средней подвижностей ионов в поровом пространстве и уменьшаются с ростом размера поровых каналов за счет снижения вклада ионов двойного электрического слоя (ДЭС) в удельную электропроводность ПС. В области малых концентраций соли, по-видимому, в основном сказывается влияние изменений среднего радиуса пор. Увеличение размеров поровых каналов при переходе от МИП стекол к макропористому стеклу приводит к закономерному уменьшению величины α при $C < 0.1$ М в согласии с теоретическими представлениями.

Числа переноса противоионов натрия n_+ в исследованных ПС были определены методом мембранного потенциала E_M в концентрационной цепи с переносом [20]:

$$n_+ = \frac{E_M}{\frac{2RT}{F} \ln(a_{\pm(1)}/a_{\pm(2)})}, \quad (6)$$

где $a_{\pm(1)}/a_{\pm(2)} \approx 2$ – отношение средних активностей электролита по обеим сторонам мембраны.

Видно (рис. 2б), что с ростом концентрации электролита величины n_+ убывают в соответствии с уменьшением вклада ионов ДЭС в процессы мембранного транспорта для всех исследованных систем. В децимолярных растворах значения n_+ практически соответствуют объемным. Видно также, что термообработка базового МИП стекла практически не сказывается на величине числа переноса, а рост среднего радиуса пор приводит для МАП образца к уменьшению значений n_+ и исчезновению идеальной селективности ($n_+ = 1$) мембраны в самом разбавленном растворе. Отметим также, что результаты определения коэффициентов эффективности и чисел переноса противоионов в ПС хорошо согласуются между собой, поскольку оба этих параметра зависят от концентраций и подвижностей ионов в поровом пространстве.

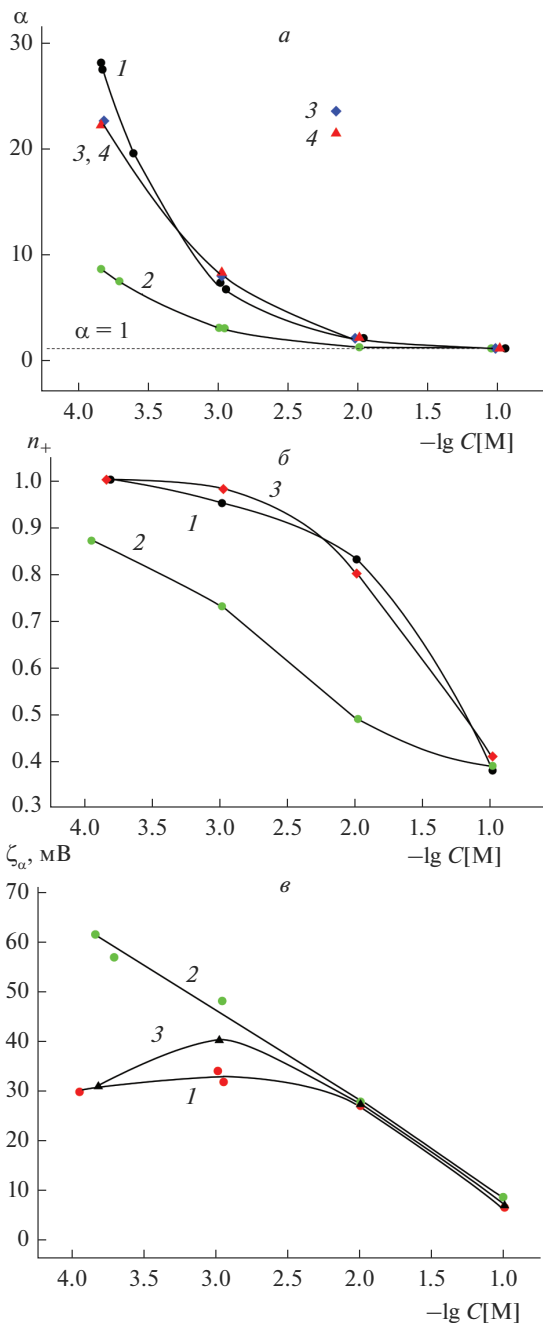


Рис. 2. Зависимости коэффициентов эффективности от концентрации растворов NaCl. 1 – 8В-НТ (3М HCl) МИП; 2 – 8В-НТ (3 М HNO₃, 0.5 М КОН) МАП, 3 – 8В-НТ (3 М HNO₃) МИП-750-1; 4 – 8В-НТ (3 М HNO₃) МИП-750-2 (*a*). Зависимости чисел переноса ионов Na⁺ от концентрации растворов NaCl. 1 – 8В-НТ (3М HCl) МИП; 2 – 8В-НТ (3 М HNO₃, 0.5 М КОН) МАП, 3 – 8В-НТ (3 М HNO₃) МИП-750-1 (*б*). Зависимости электрокинетического потенциала от концентрации растворов NaCl. 1 – 8В-НТ (3М HCl) МИП; 2 – 8В-НТ (3 М HNO₃, 0.5 М КОН) МАП, 3 – 8В-НТ (3 М HNO₃) МИП-750-1 (*в*).

Электрокинетические потенциалы ζ_{α}^* в исследованных системах были найдены методом потенциала течения E_S (хлорсеребряные электроды, мультиметр Fluke 8846A/Su) в нейтральной области рН и рассчитаны с учетом поверхностной проводимости и перекрывания двойных электрических слоев [21]

$$\zeta_{\alpha}^* = (\eta k E_S / \epsilon \epsilon_0 P) / f(k r_{\beta}, \zeta_{\alpha}^*, \beta^*), \quad (7)$$

где P – приложенное давление, ϵ , ϵ_0 – диэлектрические проницаемости среды и вакуума соответственно, $f(k r_{\beta}, \zeta_{\alpha}^*, \beta^*)$ – функция, учитывающая влияние перекрывания ДЭС на измеряемую величину потенциала течения, $\beta^* = \epsilon^2 \epsilon_0^2 R^2 T^2 k^2 / F^2 \kappa \eta$ – параметр, учитывающий свойства электролита, $k = \left[(F^2 \sum_i z_i^2 C_i) / \epsilon \epsilon_0 R T \right]^{1/2}$ – параметр Дебая, η – вязкость флюида, z_i и C_i – заряды и концентрации ионов, входящих в состав электролита.

Во всех исследованных системах (рис. 2б) значения ζ_{α}^* были отрицательны и наблюдалось увеличение их абсолютных значений при уменьшении концентрации раствора в соответствии с теоретическими представлениями о структуре ДЭС. При дальнейшем разбавлении электролита до 10^{-4} М, величины $|\zeta_{\alpha}^*|$ для МИП образцов оставались практически постоянными или уменьшались, что может быть связано как с недостатками теории при малых электрокинетических радиусах, так и с изменениями положения границы скольжения в разбавленных растворах. Для макропористого стекла зависимость $\zeta_{\alpha}^* - \lg C$ в исследованном концентрационном диапазоне оставалась линейной. Заметные различия величин электрокинетических потенциалов для базового и термообработанного при 750°C МИП образцов наблюдались в интервале концентраций растворов $\text{NaCl } 6 \times 10^{-4} - 5 \times 10^{-3}$ М – термообработка образца привела к росту значений $|\zeta_{\alpha}^*|$ за счет приближения границы скольжения к поверхности порового канала вследствие спекания вторичного кремнезема в поровом пространстве.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведено исследование и сопоставление структурных параметров и транспортных характеристик микро- и макропористых стекол, а также термообработанных при 750°C микропористых стекол. Дополнительная температурная обработка микропористых стекол приводит к уменьшению величин удельной поверхности, коэффициента структурного сопротивления и увеличению среднего радиуса пор, что связано с укрупнением глобул тонкодисперсного аморфного кремнезема, содержащегося в поровом пространстве, и с исчезновением малых пор. Выявлено, что структурные параметры микропористых стекол, подвергнутых температурной обработке, изменяются с течением длительного контакта с растворами электролитов в меньшей степени, чем параметры базовых микропористых стекол. Структурные параметры макропористых стекол, из порового пространства которых удален вторичный кремнезем, практически не изменяются. Обнаружено, что величины электропроводностей и чисел переноса противоионов микропористых и термообработанных мембран близки в области концентраций от 0.1 до 0.0001 М растворов NaCl при нейтральных значениях рН, тогда как величины для макропористых мембран значительно меньше. Наблюдаемые закономерности связаны размером пор и влиянием диффузной части двойного электрического слоя в процессы мембранного транспорта. Величины электрокине-

тического потенциала становятся функцией структурных параметров стекол в разбавленных растворах NaCl при $C < 0.01$ М.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-03-01206 – исследование структурных параметров и № 20-03-00544а – исследование электроповерхностных характеристик). Исследования проведены с использованием оборудования ресурсных центров Научного парка СПбГУ “Нанотехнологии”, “Инновационные технологии композитных наноматериалов”, “Криогенный отдел”.

Часть работы, касающаяся синтеза исследованных материалов, выполнена в рамках государственного задания ИХС РАН при поддержке Минобрнауки России (тема № АААА-А19-119022290087-1).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Baig N., Kammakam I., Falath W.* Nanomaterials: a review of synthesis methods, properties, recent progress, and challenges: A review // *Mater. Adv.* 2021. V. 2. P. 1821–1871.
2. *Antropova T.* Morphology of the Porous Glasses. *Colloid-Chemical Aspect* // *Optica Applicata.* 2008. V. 38. № 1. P. 5–16.
3. *Preisling H., Enke D.* Relations between texture and transport properties in the primary pore system of catalyst supports. // *Colloids and Surfaces A.* 2007. V. 300(1–2). P. 21–29.
4. *Hasanuzzaman M., Rafferty A., Sajjia M., Olabi A.-G.* Production and Treatment of Porous Glass Materials for Advanced Usage // *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering.*
5. *Rysiakiewicz-Pasek E., Cizman A., Antropova T., Gorokhovatsky Y., Pshenko O., Fomicheva E., Drozdova I.* An insight into inorganic glasses and functional porous glass-based nanocomposites // *Materials Chemistry and Physics.* 2020. V. 243. P. 122585–122593.
6. *Ermakova L., Sidorova M., Antropova T., Jura N., Lurie S.* Porous glass membranes as modal disperse systems // *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects.* 2006. V. 282–283. P. 279–286.
7. *Волкова А.В., Ермакова Л.Э., Антропова Т.В., Сидорова М.П.* Адсорбция потенциалопределяющих ионов на пористых стеклах различного состава // *Коллоид. журн.* 2010. Т. 72. № 1. С. 8–16.
8. *Kreisberg V.A., Antropova T.V.* Changing the relation between micro- and mesoporosity in porous glasses: The effect of different factors // *Microporous and Mesoporous Materials.* 2014. V. 190. № 1. P. 128–138.
9. *Vasilevskaya T.N., Antropova T.V.* Small Angle X-Ray Scattering Study of the Structure of Glassy Nanoporous Matrices // *Physics of the Solid State.* 2009. V. 51. № 12. P. 2537–2545.
10. *Karnik R., Fan R., Yue M., Li D.Y., Yang P.D., Majumdar A.* Electrostatic control of ions and molecules in nanofluidic transistors // *Nano Lett.* 2005. V. 5. № 5. P. 943–948.
11. *Hsu W.L., Inglis D.W., Jeong H., Dunstan D.E., Davidson M.R., Goldys E.M., Harvie D.J.E.* Stationary chemical gradients for concentration gradient-based separation and focusing in nanofluidic channels // *Langmuir.* 2014. V. 30. P. 5337–5348.
12. *Kim D.K., Duan C.H., Chen Y.F., Majumdar A.* Power generation from concentration gradient by reverse electrodialysis in ion-selective nanochannels // *Microfluid. Nanofluid.* 2010. V. 9. P. 1215–1224.
13. *Lian C., Liu H.L., Li C.Z., Wu J.Z.* Hunting ionic liquids with large electrochemical potential windows // *AIChE J.* 2019. V. 65. P. 804–810.
14. *Rolison D.R., Long J.W., Lytle J.C., Fischer A.E., Rhodes C.P., McEvoy T.M., Bourga M.E., Lubers A.M.* Multifunctional 3D nanoarchitectures for energy storage and conversion // *Chem. Soc. Rev.* 2009. V. 38. № 1. P. 226–252.
15. *Huang K.D., Yang R.J.* A nanochannel-based concentrator utilizing the concentration polarization effect // *Electrophoresis.* 2010. V. 29. P. 4862–4870.
16. *Lai C.C., Chang C.J., Huang Y.S., Chang W.C., Tseng F.G., Chueh Y.L.* Desalination of saline water by nanochannel arrays through manipulation of electrical double layer // *Nano Energy.* 2015. V. 12. P. 394–400.
17. *Ермакова Л.Э., Антропова Т.В., Волкова А.В., Кузнецова А.С., Гринкевич Е.А., Анфимова И.Н.* Структурные параметры мембран из пористого стекла в водных растворах электролитов, содержащих однозарядные (Na^+ , K^+) и трехзарядные (Fe^{3+}) катионы // *Физика и химия стекла.* 2018. Т. 44. № 4. С. 346–360.

18. *Zhdanov S.P.* Porous glasses and their structure // *Wiss. Z. Friedrich-Schiller-Univ. Jena: Naturwiss. Reihe.* 1987. V. 36, nos. 5–6. P. 817–830
19. *Ермакова Л.Э., Волкова А.В., Антропова Т.В., Муртузалиева Ф.Г.* Коллоидно-химические характеристики пористых стекол различного состава в растворах KNO_3 . I. Структурные и электрокинетические характеристики мембран // *Коллоид. журн.* 2014. Т. 76. № 5. С. 594–601.
20. *Ермакова Л.Э., Гринкевич Е.А., Волкова А.В., Антропова Т.В.* Структурные и электроповерхностные свойства железосодержащих пористых стекол в растворах NaCl . I. Структурные и транспортные характеристики пористых стекол // *Коллоид. журн.* 2018. Т. 80. № 5. С. 518–527.
21. *Levine S., Marriott J.R., Neale G., Epstein N.* Theory of electrokinetic flow in fine cylindrical capillaries at high zeta-potentials // *J. Colloid Interface Sci.* 1975. V. 52. № 1. P. 136–149.