

УДК 541 (64+13)

ИОНООБМЕННЫЕ МЕМБРАНЫ: ПОЛИМЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ, СПОСОБЫ ФОРМОВАНИЯ, ОСОБЕННОСТИ ГИДРАТАЦИИ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

© 1993 г. Ю. Э. Кирш

Научно-исследовательский физико-химический институт им. Л. Я. Карпова

103064 Москва, ул. Обуха, 10

Поступила в редакцию 10.06.92 г.

Рассмотрены общие подходы формования ионообменных мембран и полимерные материалы в качестве их основы. Выделены три группы способов получения мембран: из расплава полимера с измельченной ионообменной смолой, полимеризацией мономеров с ионогенными группами или без них в пленке или армирующей основе с последующей модификацией и поливом пленок из растворов с пленкообразующим полимером. Обобщены факторы, влияющие на электропроводность и числа переноса i противоионов "гетерогенных" ионообменных мембран из ПЭ и ионообменной смолы. На примере "гомогенных" ионообменных мембран, полученных методом полива из растворов сульфонатсодержащих жесткоцепных ароматических ПА, показана возможность регулирования этих параметров в зависимости от содержания в сополимере фрагментов с группами SO_3^- . Найден состав сополимеров, при котором ионообменные мембранны обладают высокой избирательностью ($i_+ = 0.96 - 0.99$) и достаточно высокой электропроводностью ($10^{-3} - 5 \times 10^{-3} \text{ Ом}^{-1} \times \text{см}^{-1}$). Обнаружен эффект селективного электротранспорта через ионообменные мембранны для катионов различного типа. Значения электропроводности снижаются в водных растворах солей при переходе от NaCl , KCl к CsCl и LiCl и определяются соотношением размеров между катионом и каналами, формирующими ионообменных мембранах.

ВВЕДЕНИЕ

Среди широкого круга мембран, нашедших практическое применение, ведущее место занимают ионообменные мембранны (ИОМ). Их используют в установках для получения питьевой воды, для очистки сточных вод в различных областях промышленности и шахтных вод, деминерализации технологической воды тепловых и атомных электрических станций и других процессах [1 - 5].

Результаты разработок ИОМ отражены в многочисленных патентах, опубликованных в 60 - 80-е годы рядом фирм Японии и США, и обобщены в работах [4, 5]. Хотя в настоящее время выпускается большое число ИОМ, потребность в них продолжает расти. В различных областях науки, техники и медицины возникают проблемы, решение которых невозможно без использования ИОМ нового поколения.

В производстве ИОМ достигнуты большие успехи. В этой связи стоит отметить химически стойкие катионообменные мембранны (КОМ), разработанные фирмой "Дюпон" на основе перфторированных полимеров с сульфокислотными группами. С их помощью был осуществлен процесс получения щелочи и хлора путем электролиза концентрированных водных растворов хлори-

того натрия или калия. Информация о способах получения полимеров и формования мембранны на их основе и о электрохимических свойствах представлена в работе [6].

В настоящем сообщении рассмотрены основные тенденции в конструировании ИОМ из полимеров другого строения с точки зрения их функционирования, условий формования и установления связи между электрохимическими характеристиками и химической структурой используемого материала. Понимание этих закономерностей позволит решить ряд проблем, относящихся к регулированию удельной и поверхностной электрической проводимости ИОМ и электротранспортных характеристик катионов или анионов различного типа и к повышению селективности мембранны в растворах с высокой ионной силой. ИОМ – это не "черный ящик", в который входят и выходят ионы, а система, имеющая конкретную структуру и обуславливающая конкретный механизм переноса ионов под действием тока.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ФОРМОВАНИЮ МЕМБРАН

Для формования ИОМ с применением синтетических полимеров используется ряд

технологических подходов. В этом ряду следует выделить три основных группы подходов.

Первая группа включает технологические способы, основанные на изготовлении пленок из расплава ПЭ с включенной измельченной ионообменной смолой на горячем барабане [1, 3].

Вторая группа основана на полимеризации виниловых мономеров с ионогенными группами или без них в пленке или армирующей основе и последующей модификацией включенных в материал полимеров.

Третья группа – это изготовление пленок методом полива с использованием растворов пленкообразующих полимеров. В этот раствор включена или измельченная ионообменная смола (ИОС), или полимер с ионогенными группами [5]. В качестве пленкообразующего полимера применяют также полимер, содержащий или сульфокислотные (КОМ), или аммонийные группы.

Основными электрохимическими характеристиками ИОМ, которые приводят в патентах или публикациях, являются удельное

$$(p_{уд} = \frac{(R_{p+m} - R_p)}{d} S, \text{ Ом} \times \text{см}) \text{ или поверхностное } (p_{пов} = (R_{p+m} - R_p) S, \text{ Ом} \times \text{см}^2) \text{ электрическое сопротивление (обратная величина означает соответствующую электрическую проводимость } \alpha_{уд} \text{ и } \alpha_{пов}, \text{ число переноса (метод ЭДС на границе двух растворов с различной концентрацией соли по обе стороны мембранны), влагосодержание (количество воды на 100 г сухой пленки) и обменная емкость по H}^+ \text{ или Na}^{+}(Cl}^- \text{ (мг-экв/г сухой мембранны) [3, 4].$$

Мембранны из расплава полимера

Рассмотрим технологические стадии получения так называемых "гетерогенных" мембран и используемые полимеры [1 - 3, 7, 8]. В качестве связующего материала применяют ПЭ, а в качестве материала – ионообменные смолы, например: КУ-2 × 8 и АВ-17 × 8 и др. Предварительно производят диспергирование ПЭ и смол до порошкообразного состояния с последующим тщательным смешением (40 масс. % ПЭ и 60 масс. % смолы). Затем порошок расплавляют на нагревом барабане с последующей вытяжкой пленки. Мембрану получают путем прессования двух пленок с армировкой из ПА-6 или ПЭТФ между ними. Электрохимические характеристики "гетерогенных" ИОМ представлены в табл. 1.

Полимеризация мономеров в матрице

Общий принцип получения ИОМ этого подхода заключается в проведении радикальной полимеризации винилового мономера в полимерной матрице, например из ПЭ, ПП, ПТФЭ и т.д. Этому принципу посвящено большое число патентов, в которых варьируется природа матрицы,

мономер, сшивающий агент, инициирующая система и другие параметры [5].

Используемые мономеры и реакции синтеза полимеров перечислены в табл. 2. Как видно, в качестве мономера в основном применяют стирол или стирол с дивинилбензолом (ДВБ). В некоторых случаях используют акриловую кислоту, винилпиридины, β-диэтиламинэтилметакрилат и т.п. В качестве матрицы – ПЭ, ПТФЭ или ПВХ, которые частично набухают в мономере (стирол + ДВБ). Под действием γ-излучения или теплового разложения инициатора внутри матрицы происходит полимеризация мономеров с одновременной прививкой получаемого полимера к матрице. В этом случае достигается определенная степень прививки, а пленки не теряют своих механических свойств.

Введение ионогенных групп в матрицу, содержащую ПС, осуществляют путем реакции ПС с хлорсульфоновой кислотой (КОМ) или хлорметилированием с последующей обработкой амином (табл. 2).

Из ПВХ и стирола с ДВБ производят ряд ИОМ под маркой "Neosepta" (Япония) с различной степенью сшивки [14 - 16]. Электрохимические характеристики ИОМ, полученные с применением ПВХ + стирол + ДВБ, приведены в табл. 3. Видно, что при увеличении концентрации сшивающего агента (ДВБ) относительно стирола уменьшается обменная емкость материала, а соответственно, и водопоглощение. Число переноса катиона (i_+) невысоко (< 0.9), а оно практически не изменяется при увеличении степени сшивки. Мембранны, полученные прививкой стирола к ПЭ под действием γ-излучения ^{60}Co с последующей модификацией, также не отличаются высокими значениями чисел переноса (табл. 4).

ПЛЕНКООБРАЗУЮЩИЕ ПОЛИМЕРЫ

Для получения ИОМ используют два полимера, один из которых является полиэлектролитом или способен приобретать свойства полиэлектролита в результате последующей обработки, а другой – инертный пленкообразующий полимер. Смесь двух полимеров растворяют в подходящем растворителе, полученный раствор наносят на ровную поверхность и после испарения растворителя получают мембрану в виде тонкой пленки.

Так, ПВДФ или сополимеры винилхлорида и акрилонитрила являются матричными материалами, а линейный сульфонатсодержащий полистирол служит полиэлектролитом [20]. Смесь этих полимеров дает гомогенный раствор в ДМФА, из которого отливают пленки. Вводят также сшивающие агенты (комплекс BF_3 с моноэтаноламином и эпоксид-новолачную смолу). Однако из

Таблица 1. Электрохимические и другие характеристики гетерогенных ИОМ на основе ПЭ и ионообменной смолы [9]

Марка ИОМ	Материал	Толщина, мм	Поверхностное электросопротивление, $\text{Ом} \times \text{см}^2$	Число переноса (0.01/0.1 моль/л NaCl) (метод ЭДС)	Влагопоглощение, г/г сухой пленки	Обменная емкость, мг-экв/г
МК-40	ПЭ + КУ-2 × 8	0.55	10	0.95	0.3	2.6
МА-40	ПЭ + АВ-17 × 8	0.5 - 0.6	10	0.92	0.3	3.8

Таблица 2. Мономеры, матрицы и реакции, используемые в получении ИОМ

Мономер	Матрица	Условия полимеризации	Реакции модификации	Литература
Стирол	ПЭ (пленка 30 мкм)	γ -Облучение ^{60}Co	XCK	[10]
	ПЭ	Пленка, набухшая в мономере, бензоилпероксид, 125°C, 1 ч	XCK	[11]
	ПТФЭ	Бензоилпероксид, 90°C, 1 ч	XCK или XM и N-метилпиперидин	[12]
Стирол + ДВБ	ПЭ	0.2% ДВБ, γ -облучение ^{60}Co с мономером	XCK или XM + триметиламин	[1]
	ПВХ	Бензоилпероксид, 110°C	XCK или XM + амин	[14 - 16]
Акриловая кислота	ПЭ	Водный раствор, γ -облучение ^{60}Co		[17, 18]
Стирол + 4-винилпиридин	Ткань из ПЭ	Облучение быстрыми электронами		[5]

Примечание. XCK – хлорсульфоновая кислота, XM – хлорметилирование.

Таблица 3. Катионообменная мембрана "Neosepta" и ее физико-химические и электрохимические параметры [19] (Основа мембранны ПВХ, толщина 0.16 мм)

Марка	Концентрация ДВБ (% от стирола)	Поверхностное электросопротивление, Ом × см ²	Число переноса (0.5/2.5 моль/л NaCl) (метод ЭДС)	Влагопоглощение, г/г сухой пленки	Обменная емкость, мг-экв/г Na ⁺ -формы
CL-2.5	2.5	2.8	0.86	0.34	1.8
CL-7	7.0	5.1	0.88	0.26	1.4
CL-20	20.0	29.0	0.89	0.18	1.0
CL-30	30.0	34.0	0.88	0.12	0.82

Таблица 4. Свойства ИОМ, полученных прививкой стирола к ПЭ (70 мкм) под действием γ -облучения [13]

Тип мембранны	Обменная емкость, мг-экв/г	Елагоемкость, %	Поверхностное сопротивление, Ом × см ²	Число переноса (0.01/0.75 моль / л KCl) (метод ЭДС)	Предел прочности на разрыв, кг/см ²
Катионообменная	0.33	5	89.3	0.80	75
	1.94	29	5.2	0.90	104
	2.14	2	8.3	0.90	130
	2.30	8	3.1	0.92	142
Анионообменная	1.41	18	7.2	0.92	46
	1.56	20	8.3	0.90	85

таких смесей трудно получить плотный материал, а при эксплуатации происходит вымывание полиэлектролита [5].

Исследователи ведут широкий поиск в подборе пленкообразующих полимеров, которые при этом содержали бы в боковом звене ионогенные группы [21 - 23]. Используют хлорированный каучук, который подвергают обработке trimetilaminom или H₂SO₄ [21]. Готовят растворы сульфированного полисульфона в ДМФА, затем отливают пленку и высушивают [22]. Электрохимические характеристики этих пленок представлены в табл. 5.

СТРУКТУРНАЯ НЕОДНОРОДНОСТЬ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ИОМ

Основными показателями ИОМ, которые определяют экономичность установки в электродиализном процессе, являются высокая поверхностная электропроводность и высокие числа переноса (~1.0). Проблема регулирования этих показателей в плане повышения удельной электрической проводимости α и чисел переноса i тесно связана с химическим строением полимерного материала, условиями формования и получаемой структурой мембранны.

Очевидно, что в зависимости от принятого технологического подхода влияние каждого из таких факторов, как химическое строение исходной матрицы, строение полимера с ионогенными группами, и условий формования на концентра-

ционное распределение ионогенных групп и молекул H₂O в мемbrane может быть существенно различной. В случае ИОМ, получаемых из расплава ПЭ с измельченной ИОС, структурная неоднородность задается как неоднородностью ионитов из ПС [24], так и условиями ее изготовления (при вытяжке пленки из расплава ПЭ) [25]. Методом эталонной порометрии установлено, что мембрана (МА-40, МК-40) в набухшем состоянии, так же как и смола (АВ-17, КУ-2), имеет поры с радиусом от 1.5 до 100 нм [26]. В мемbrane присутствуют крупные поры ~10³ нм, что является результатом механических дефектов, возникающих при вытяжке [25].

Для установления связи между электрохимическими характеристиками и внутренней структурой гетерогенных ИОМ предложен эмпирический подход, в котором мембрана представлена в виде проводящей системы из гелевой и межгелевой фаз с различными их долями [27].

Влияние концентрации соли различного типа (LiCl, NaCl, KCl) на удельную электропроводимость α и влагосодержание мембранны МК-40 представлено на рис. 1. Видно, что природа соли и ее концентрация влияют на величину α . Добавление соли повышает α .

В случае LiCl и NaCl значения α близки друг к другу и достигают предела при [NaCl] = 3 моль/л, а в случае KCl они превышают таковые для других солей. Влагосодержание мембранны, т.е. количество молекул воды на одну группу SO₃⁻, изменяется незначительно и слабо падает (от 15

Таблица 5. Свойства ИОМ, полученных из хлоркаучука и полисульфона

Материал	Толщина пленки, мкм	Поверхностное сопротивление, Ом см ²	Число переноса (0.1/0.2 моль/л NaCl) (метод ЭДС)	Статическая обменная емкость, мг экв/г	Литература
Хлоркаучук + + триметиламин	120	0.6	0.85	2.3	[21]
Хлоркаучук + H ₂ SO ₄	64	25	0.86	0.7	[21]
Сульфированный полисульфон	190	6	0.88	1	[22]

до 12 молекул) при увеличении [NaCl] до 3 моль/л. Видно, что влагосодержание мембраны увеличивается при переходе от KCl, NaCl и LiCl.

Ход этих зависимостей, а именно повышение α с ростом концентрации соли, объяснен с точки зрения модели мембранны как двухфазной проводящей системы. При увеличении концентрации соли в растворе растет электропроводность межгелевой фазы, которая, как полагают [28], представляет собой водный раствор внутри мембранны, при практическом постоянстве α для гелевой фазы (ИОС и ПЭ). Однако эта модель не в состоянии объяснить явление избирательности по противоиону для гетерогенных мембран, содержащих крупные поры.

Влияние концентрации NaCl на числа переноса противоионов i_+ в КОМ, изготовленной из ПЭ и КУ-2 × 8 [25], показано на рис. 2. При увеличении [NaCl] от 0.1 до 3 моль/л i_+ падает от 0.95 до 0.6. Это означает, что избирательность переноса противоиона такой "гетерогенной" мембранны весьма чувствительна к колебанию [NaCl] по обе стороны мембранны [29, 30] и резко снижается даже при ее незначительном повышении.

Анализ поляризационных характеристик (вольт-амперная зависимость, величина предельного тока относительно такового для идеальной мембранны и др.) "гетерогенных" мембран, установленных методом врачающегося мембранны диска, позволяет сделать вывод, что концентрационная поляризация в этом случае охватывает не только примембранныю область (δ -слой) в растворе, но и приповерхностную область в порах гетерогенной мембранны, занятых необменно сорбированным электролитом. В силу этого величина предельного тока может заметно снижаться, а следовательно, понижается общая эффективность процесса [31].

Мембранны, полученные пастовым методом [14 - 16] или путем прививки стирола к матрице [13], характеризуются невысокими числами переноса (0.8 - 0.9). Эти способы приводят к неоднородному распределению ионогенных групп внутри мембранны. Ионогенные группы располагаются только на цепи ПС, а не на макромолекулах матрицы (ПЭ, ПВХ и др.).

При применении двух технологических подходов получения ИОМ (из расплава и полимеризация виниловых мономеров) технологические стадии (подготовка материалов, смешение ИОС с инертной порошкообразной матрицей, условия формования или прививки и др.) в значительной степени определяют электрохимические параметры конечного продукта. Как следует из сказанного выше, внутри "гетерогенных" мембран находятся крупные частицы ИОС (10 - 50 мкм), окруженные инертной матрицей, и мелкие и крупные поры, куда проникает электролит. Влияние структуры полимера, содержащего ионогенные группы, на электрохимические свойства таких ИОМ полностью теряется.

Изучение влияния химического строения полимерного носителя ионогенных групп на эти показатели скорее всего следует проводить с

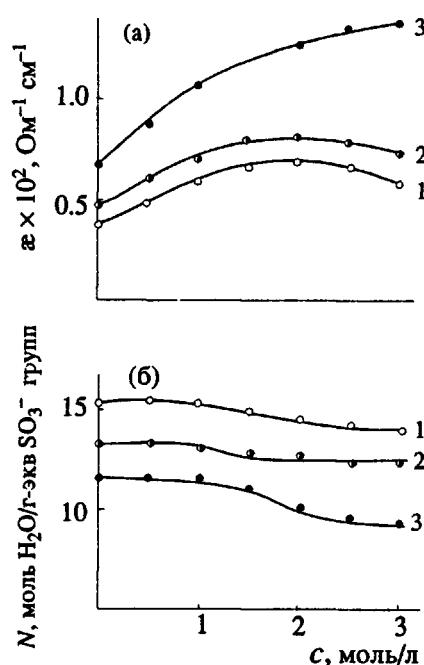


Рис. 1. Влияние концентрации соли LiCl (1), NaCl (2) и KCl (3) на удельную электропроводность α мембранны MK-40 (а) и содержание H_2O в ней (б). N – число молей $H_2O/g\text{-экв}$ групп SO_3^- [25].

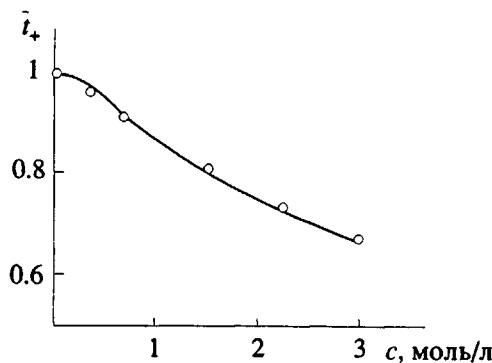


Рис. 2. Зависимость чисел переноса противоинов для мембраны МК-40, определенных методом ЭДС, от концентрации NaCl в растворе [25].

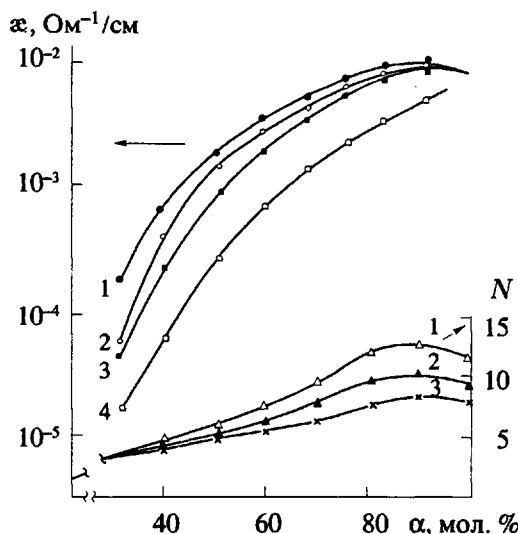


Рис. 3. Зависимость удельной электропроводности и числа молекул воды на среднее звено полимера от содержания фрагментов с сульфокислотной группой α в Na^+ (1), K^+ (2), Cs^+ (3) и Li^+ -формах (4) [32].

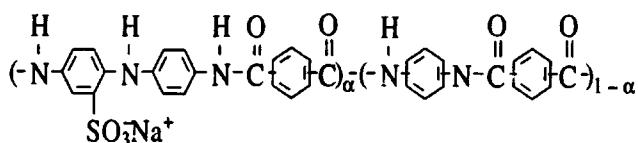
примениением ИОМ, получаемых поливом растворов пленкообразующих полимеров с ионогенными группами. В этом случае достигается более равномерное распределение ионогенных групп в толще мембранны.

ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ГИДРАТАЦИЯ ГОМОГЕННЫХ МЕМБРАН ИЗ АРОМАТИЧЕСКИХ ПОЛИАМИДОВ

С целью выяснения факторов, определяющих электропроводность и селективность ионного переноса, наибольший интерес представляют ИОМ, полученные из пленкообразующего полимера, например сульфонатсодержащих полифе-

ниченфталамидов [32]. В ряду этих полимеров имеются широкие возможности варьирования состава, конфигурации цепи, локального окружения и других параметров.

Сополимеры имеют следующее строение:



Изменение молярной доли фрагмента с сульфонатной группой позволило регулировать удельную электропроводность α пленок (толщина 50 - 70 мкм) в весьма широких пределах от 10^{-4} до 10^{-2} $\text{Ом}^{-1}/\text{см}$ (рис. 3), а также избирательность переноса катионов различной природы. При малом содержании сульфокислотных групп ($\alpha < 30\%$) пленки обладают большим электросопротивлением ($\leq 10^{-5}$ $\text{Ом}^{-1}/\text{см}$). Значение α зависит от природы катиона и возрастает в ряду $\text{Li}^+ < \text{Cs}^+ < \text{K}^+ < \text{Na}^+$. Начиная с некоторой величины α , рост $\lg \alpha$ с увеличением α существенно замедляется. Заметный изгиб кривой наблюдается при $\alpha = 40, 45, 50$ и 60% в растворах $\text{NaCl}, \text{KCl}, \text{CsCl}, \text{LiCl}$ соответственно. При этих же α величина α практически одинакова (10^{-3} $\text{Ом}^{-1}/\text{см}$) в растворах с NaCl, KCl и CsCl . При высоких α ($80 - 90$ мол. %) α стремится к одной величине (10^{-2} $\text{Ом}^{-1}/\text{см}$) для тех же солей. В случае LiCl значение α для КОМ остается более низким и для этого состава сополимера.

Гидратацию функциональных групп и катиона в пленке можно регулировать, изменяя состав сополимера и тип катиона (рис. 3). С увеличением фрагментов с сульфокислотной группой число N (число молекул H_2O , приходящихся на одно звено сополимера) растет от 1 для полифениленизофталамида ($\alpha = 0$) до 12 для поли-2-сульфонат-4,4'-дифениламиноизофталамида ($\alpha = 100\%$) в растворе с NaCl . Для всех составов влагоемкость падает при переходе от $\text{Na}^+(\text{Li}^+)$ к K^+ - и Cs^+ -формам КОМ.

Хотя пленки из сополимеров с высоким α ($80 - 90\%$) и содержат различное число молекул воды в зависимости от природы противоиона ($\text{Na}^+ - 13 - 15, \text{K}^+ - 10, \text{Cs}^+ - 6$), значение α остается практически одинаковым (10^{-2} $\text{Ом}^{-1}/\text{см}$). Это означает, что материал матрицы при таком содержании молекул H_2O оказывает слабое влияние на электротранспорт ионов в каналах. В то же время при определенном составе сополимера, зависящем от природы катиона (изгиб на зависимости $\lg \alpha$ от α), пленки имеют одинаковую электропроводность (10^{-3} $\text{Ом}^{-1}/\text{см}$) и содержат одинаковое число молекул воды на среднем звене сополимера (4 - 5) при различных типах ионов (рис. 3). При уменьшении N ($< 4 - 5$), как видно, электротранспорт ионов становится весьма затруднительным.

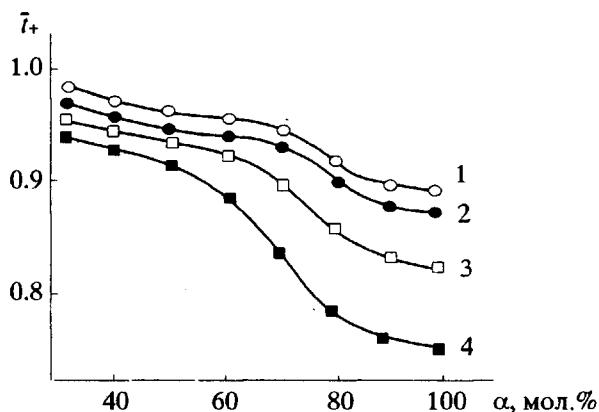


Рис. 4. Влияние состава сополимера на число переноса противоионов для мембран, изготовленных из этих сополимеров, при концентрации NaCl 0.1 (1), 1.0 (2), 2.0 (3) и 3.0 (4) моль/л с одной стороны мембраны относительно водного раствора и 0.01 моль/л — с другой (метод ЭДС) [32].

Обнаруженные закономерности поведения α и гидратного состояния от состава в растворах различных солей объяснены формированием в мембране путей (каналов) для перемещения ионов под действием тока. Средний диаметр сечения каналов определяется молярным соотношением всех фрагментов, входящих в цепь. Это — сульфокислотные группы, амидные группы, способные к образованию водородных связей с молекулой H_2O и соседними звеньями, и бензольные кольца. Катионы, вероятно, и их размеры ограничивают число молекул H_2O в канале. Жесткий характер конструкции этих каналов обусловлен жесткостью полиамидной цепи (высокий барьер вращения групп $\text{C}=\text{N}$ в амидной группе, объемные бензольные кольца, водородные связи $\text{C}=\text{O}\dots\text{NH}$ между цепями).

Различный размер каналов формируется при изменении состава сополимера, что и позволяет выявить селективность электротранспорта для ионов различного размера. При условии, когда $N < 4 - 5$ молекул H_2O , каналы начинают разделять ионы по их размерам. Для движения ионов большего размера (Cs^+) создаются большие стерические затруднения, чем для ионов меньшего размера (Na^+). В случае Li^+ , размер которого меньше других ионов, увеличение сопротивления обусловлено, вероятно, тем, что ион Li^+ при таком гидратном окружении сильно взаимодействует с сульфонатной группой [33, 34].

Размеры каналов определяют селективность переноса катиона по сравнению с анионом, которая характеризуется числом переноса i_+ через мембрану (рис. 4). Мембранны, обладающие избирательностью для переноса катионов различной природы ($\alpha < 50\%$), отличаются высоким i_+

(0.95 - 0.98) и малой чувствительностью к повышению концентрации соли от 0.1 до 3 моль/л.

Методом ИК-спектроскопии установлено, что молекулы H_2O находятся вблизи двух амидных групп, сульфогруппы и катиона.

Проведена оценка среднего размера (диаметра) каналов, образующихся в набухших пленках из ПА с $\alpha = 40, 45$ и 50 мол. %. Так, средний диаметр каналов в КОМ из ПА с $\alpha = 50, 45$ и 40 мол. % составляет ~10; 9.3 и 8.6 Å соответственно [32].

Роль амидных групп в изученной системе для проявления высокой селективности и электропроводности является весьма существенной. Из-за их высокой локальной концентрации в канале и способности к образованию водородных связей с молекулами H_2O эти группы, по-видимому, создают условия для перемещения молекул H_2O и ионов, близкие к тем, которые реализуются в объеме водной среды. Амидные группы, как предложено ранее [35], играют важную роль в преимущественном переносе H_2O по сравнению с ионами в каналах обратноосмотических мембран под высоким давлением.

Таким образом, принятый подход в исследовании ИОМ, основанный на применении пленкообразующего материала в качестве основы, позволил понять факторы, регулирующие электропроводность и избирательность переноса ионов в гомогенных ИОМ, и подойти к разработке высокоселективных ИОМ нового типа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Block M. // Chem. and Ind. 1967. V. 50. P. 2099.
- Ласкорин Б.Н., Смирнова Н.М., Гантыян М.Н. Ионообменные мембранны и их применение. М.: Госатомиздат, 1961. С. 287.
- Ионообменные мембранны в электродиализе / Под ред. Салададзе К.М. Л.: Химия, 1970. С. 287.
- Смагин В.Н., Медведев И.Н., Кожевников Н.Е., Садчикова Т.П. Применение мембранных методов разделения веществ. М., 1985. Вып. 10 (240). С. 40.
- Медведев И.Н., Нефедова Г.З., Смагин В.Н., Кожевникова Н.Е., Брауде К.П. Синтез, свойства и применение ионитовых мембранны в электродиализе. М., 1985. Вып. 11 (241). С. 42.
- Кириш Ю.Э., Смирнов С.А., Попков Ю.М., Тимашев О.Ф. // Успехи химии. 1990. Т. 59. № 6. С. 970.
- Hale D.K., McCauley D.J. // Trans. Faraday Soc. 1961. V. 57. N. 1. P. 135.
- Kumina C., London A. // J. Polym. Sci. 1960. V. 46. P. 395.
- Энциклопедия полимеров. Сов. энциклопедия, 1972. Т. 2. С. 171.
- Chen W.K.-W. Pat. 3 247 133. USA. 1966.
- Zentifman H. Pat. 3 304 272. USA. 1967.
- Chen W.K.-W., Halter H.M., Hotelling E.B. Pat. 3 257 334. USA. 1966.