




Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2022. Т. 22, вып. 2. С. 133–141
Izvestiya of Saratov University. Chemistry. Biology. Ecology, 2022, vol. 22, iss. 2, pp. 133–141
<https://ichbe.sgu.ru>

<https://doi.org/10.18500/1816-9775-2022-22-2-133-141>

Научная статья
УДК 543:615.33

Транспортные свойства немодифицированных и модифицированных нанотрубками полианилина амоксициллинселективных мембран



Р. К. Мурсалов , Е. Г. Кулапина, Н. А. Бурмистрова, А. И. Воеводина

Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, Россия, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83

Мурсалов Руслан Кямранович, аспирант кафедры аналитической химии и химической экологии Института химии, ruslan.mursalov2011@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7754-5469>

Кулапина Елена Григорьевна, доктор химических наук, профессор кафедры аналитической химии и химической экологии Института химии, kulapinaeg@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5644-5039>

Бурмистрова Наталия Анатольевна, доктор химических наук, профессор кафедры общей и неорганической химии Института химии, naburmistrova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8137-1599>

Воеводина Анастасия Ильинична, студент 4-го курса Института химии, voievodina_anastasiia@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4638-6183>

Аннотация. Транспортные процессы, протекающие в полимерных матрицах, характеризуют их физико-химические свойства, определяют направления практического применения. Критически рассмотрены литературные данные по ионному транспорту в пластифицированных полимерных мембранах, теоретическим аспектам мембранного транспорта. Показаны влияние модификатора на транспортные свойства мембран и возможность реализации новой амоксициллинселективной пластифицированной мембраны на основе ассоциатов диметилдистеариламмония с комплексными соединениями серебра (I)-амоксициллин ($[Ag(Амоx)_2]DMDSA$), в состав которой входит молекулярно-импринтированный полимер (МИП) – нанотрубки полианилина (PANI NT), представляющие особый интерес в качестве модификаторов сенсорных и мембранных композиций. Изучены транспортные свойства немодифицированных и модифицированных нанотрубками полианилина пластифицированных поливинилхлоридных мембран. Установлено влияние концентрации активных компонентов мембран, примембранных растворов антибиотиков, модификатора на транспортные свойства. Оценены количественные характеристики мембранного транспорта: коэффициент проницаемости и поток ионов.

Ключевые слова: поливинилхлоридные пластифицированные мембраны, ионный транспорт, амоксициллин, нанотрубки полианилина

Для цитирования: Мурсалов Р. К., Кулапина Е. Г., Бурмистрова Н. А., Воеводина А. И. Транспортные свойства немодифицированных и модифицированных нанотрубками полианилина амоксициллинселективных мембран // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2022. Т. 22, вып. 2. С. 133–141. <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2022-22-2-133-141>

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Article

Transport properties of unmodified and modified polyaniline nanotubes of amoxicillin-selective membranes

R. K. Mursalov , E. G. Kulapina, N. A. Burmistrova, A. I. Voevodina

Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia

Ruslan K. Mursalov, ruslan.mursalov2011@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7754-5469>

Elena G. Kulapina, kulapinaeg@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5644-5039>

Natalia A. Burmistrova, naburmistrova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8137-1599>

Anastasiia I. Voevodina, voievodina_anastasiia@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4638-6183>

Abstract. The transport processes occurring in polymer matrix characterize their physico-chemical properties, determine the directions of practical application. The literature data on ion transport in plasticized polymer membranes and theoretical aspects of membrane transport are critically reviewed. The effect of the modifier on the transport properties of membranes is shown. The article shows the possibility of implementing a new amoxicillin-selective plasticized membrane ($[Ag(Амоx)_2]DMDSA$), which includes a molecular imprinted polymer (MIP) – polyaniline nanotubes (PANI NT), which are of particular interest as modifiers of sensory and membrane compositions. The transport properties of unmodified and



modified polyaniline nanotubes of plasticized polyvinyl chloride membranes have been studied. The effect of the concentration of near-membrane aqueous solutions of antibiotics, modifier on transport properties has been established. Quantitative characteristics of membrane transport are estimated: permeability coefficient and ion flux.

Keywords: polyvinyl chloride plasticized membranes, ion transport, amoxicillin, polyaniline nanotubes

For citation: Mursalov R. K., Kulapina E. G., Burmistrova N. A., Voevodina A. I. Transport properties of unmodified and modified polyaniline nanotubes of amoxicillin-selective membranes. *Izvestiya of Saratov University. Chemistry. Biology. Ecology*, 2022, vol. 22, iss. 2, pp. 133–141 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2022-22-2-133-141>

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

Введение

Мембранное разделение посредством полимерных мембран имеет разноплановые области и подходы применения [1–3]. Для определения количественных характеристик ионного транспорта в полимерных пластифицированных мембранах проведен анализ литературных данных, охватывающих теоретические и практические аспекты расчета транспортных характеристик. Исследованы взаимозависимости между сопротивлением мембраны, предельным током и числами переноса коионов и противоионов [4, 5]. Процессы переноса частиц, диффундирующих при мембранном транспорте, сочетают последовательные стадии: перенос компонентов исходного потока к мембране; внедрение этих компонентов в мембрану; транспорт компонентов через мембрану с последующим отводом продуктов разделения [6].

Сопротивление мембраны вносит весомый вклад в общее описание количественных свойств и процессов мембранного транспорта. Закономерен факт увеличения сопротивления при уменьшении концентрации, показано, что сопротивление не является постоянной величиной [7–9]. Применимость разных подходов к определению данного параметра приводит к получению различных результатов. Изучалось влияние температуры на транспорт ионов через ионообменные мембраны. В данном случае речь идет о линейном законе Онзагера [10].

В ионитовых мембранах выполняются свойства полупроницаемой мембраны, через которую способны проникать частицы только определенного сорта. Однако с увеличением концентрации раствора избирательная проницаемость мембран уменьшается, характер зависимости мембранного потенциала от концентрации раствора изменяется [11, 12].

По величинам стационарных сопротивлений рассчитаны кажущиеся константы диссоциации ($K_{дис}$) ассоциатов β -лактам-тетрадециламмоний в мембранной фазе методом Краусса–Брея [13].

Отмечается, что при увеличении временного диапазона синтеза для мембран PANI/МФ-4СК морфология фибриллярного типа изменяется на

гранулярную, что является важным обстоятельством при изучении проводимости [14, 15]. Для улучшения транспортных свойств мембраны модифицируют токопроводящими полимерами [16–26].

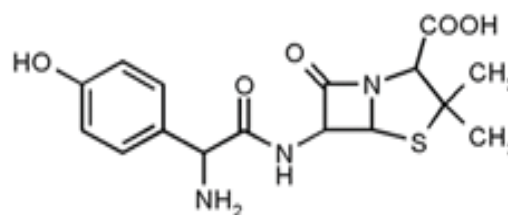
Целью настоящей работы явилась оценка влияния нанотрубок полианилина на транспортные свойства мембран на основе ассоциатов диметилдистеариламмония (ДМДСА) с комплексными соединениями серебро (I)-амоксициллин $Ag(Aмоx)_2ДМДСА$, оценка проницаемости и потока ионов для амоксициллина.

Материалы и методы

В работе исследованы пластифицированные поливинилхлоридные мембраны на основе ассоциатов диметилдистеариламмония с комплексными соединениями серебро (I)-амоксициллин.

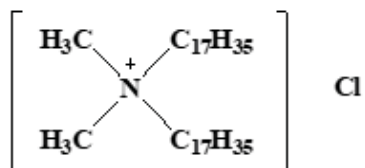
Названия и формулы используемых веществ представлены ниже на схемах:

Амоксициллин (Амоx) – полусинтетический пенициллиновый антибиотик. Коммерческое название препарата «Амоксициллин», фирма-производитель: АО «Биохимик», Россия; форма выпуска: таблетки (заявленное содержание активного вещества 500 мг).



Растворы амоксициллина концентрации 0,01 М готовили растворением соответствующих навесок в дистиллированной воде; рабочие растворы с концентрациями $1 \cdot 10^{-3}$; $1 \cdot 10^{-4}$; $1 \cdot 10^{-5}$; $1 \cdot 10^{-6}$; $1 \cdot 10^{-7}$ М готовили последовательным разбавлением.

Раствор хлорида диметилдистеариламмония (ДМДСА) с концентрацией 0,01 М готовили по точной навеске препарата (0,0558 г) и количественно переносили в делительную воронку, растворяли в 10 мл хлороформа. Структурная формула диметилдистеариламмония хлорида:



В работе применяли 0,01 М растворы нитрата серебра, в качестве модификаторов использованы нанотрубки полианилина.

Использовали весы аналитические AND Company Limited HR-250 A 252g / 0,1 mg Япония. В исходных 0,01 М водных растворах амоксциллина отделяли вспомогательные вещества путем фильтрования с помощью обеззоленных фильтров «Синяя лента».

Синтез электродноактивного вещества (ЭАВ) описан авторами в [27].

Получение пластифицированных мембран осуществляли внесением в бюкс электродноактивного вещества, растворителя-пластификатора ДБФ. Затем при перемешивании на магнитной мешалке добавляли 3 мл растворителя (циклогексанон) и постепенно навеску поливинилхлорида (соотношение ПВХ:ДБФ по

массе равно 1:3). Перемешивание продолжали до тех пор, пока не образуется гомогенная смесь. Полученную мембранную композицию выливали в чашку Петри и оставляли под тягой до полного испарения растворителя. Высушивание проводили на строго горизонтальной поверхности для получения мембраны одинаковой толщины. Приготовленная мембрана имеет вид эластичной и прозрачной пленки толщиной около 0,5 мм и хранится над парами ДБФ. Для получения пластифицированных модифицированных мембран применен аналогичный алгоритм (с учетом соотношения навесок электродноактивного вещества и модификатора 1:1).

Транспортные свойства мембран изучали методом приложенного потенциала с использованием четырехэлектродной схемы, состоящей из пары платиновых (токопроводящих) и пары хлоридсеребряных (регистрирующих) электродов [16]. Ячейка представляет собой цилиндр, состоящий из двух равных отсеков, между которыми наклеена мембрана диаметром 1 см (рис. 1).

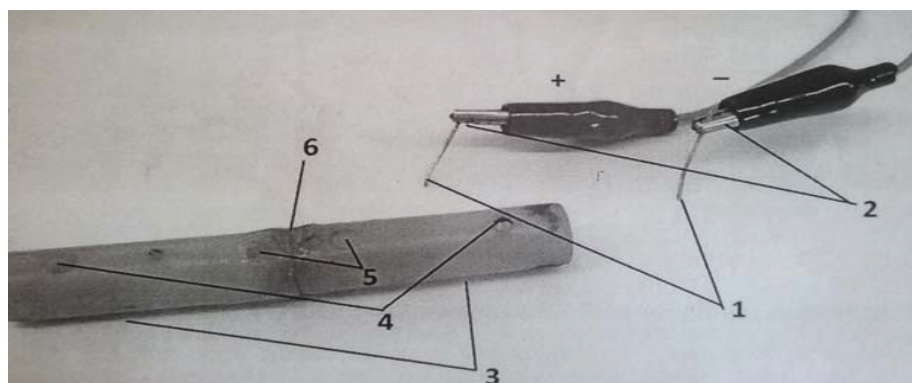


Рис. 1. Устройство электрохимической ячейки: платиновые электроды ($l = 1$ см) (1), контакты типа «крокодил» (2), отсеки электрохимической ячейки (3), гнезда под платиновые электроды (4), гнезда под солевые мосты (5), мембрана (6)

Fig. 1. Electrochemical cell device: platinum electrodes ($l = 1$ cm) (1), «crocodile» type contacts (2), compartments of the electrochemical cell (3), sockets for platinum electrodes (4), sockets for salt bridges (5), membrane (6)

Напряжение на мембране при прохождении тока регистрировали с помощью двух электродов сравнения, подключенных к мультиметру DT9202A и последовательно подключённому микроамперметру М244. Источником поляризации служил гальваностат.

Для определения сопротивления пластифицированных мембран с поливинилхлоридной матрицей на основе ассоциатов диметилдистеариламмония с комплексными соединениями серебро (I)-амоксциллин в от-

сек электрохимической ячейки (приемник) помещается раствор антибиотика с концентрацией $C = 1 \cdot 10^{-7}$ М, а в отсек источника – раствор антибиотика с большей концентрацией ($1 \cdot 10^{-2}$, $1 \cdot 10^{-3}$, $1 \cdot 10^{-4}$ М). Серия растворов в пробирках на 10 мл была приготовлена из исходного раствора амоксциллина концентрации 0,01 М. При снятии показаний с прибора в ходе эксперимента заметно изменяются как напряжение, так и сила тока, в зависимости от состава и свойств исследуемой мембраны.



Исходя из величин данных параметров, рассчитывается электрическое сопротивление мембраны по закону Ома:

$$R = \frac{U}{I},$$

где R – сопротивление мембраны, МОм; U – напряжение на мембране, В; I – сила тока, мкА.

Результаты и их обсуждение

Исследованы транспортные свойства немодифицированных и модифицированных нанотрубками полианилина пластифицированных мембран на основе ассоциатов диметилдистеариламмония с комплексными соединениями серебро (I)-амоксициллин при варьировании концентрации ЭАВ и амоксициллина в примембранных растворах $1 \cdot 10^{-2} - 1 \cdot 10^{-7}$ М (рис. 2).

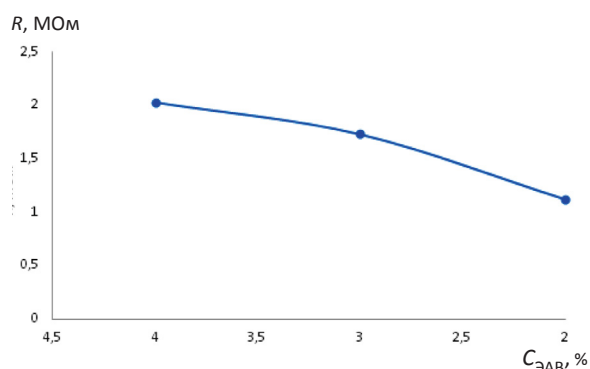


Рис. 2. Зависимость стационарного сопротивления пластифицированной мембраны $[\text{Ag}(\text{Амох})_2]\text{ДМДСА}$ от концентрации ЭАВ; C (примембранная) $1 \cdot 10^{-4} | 1 \cdot 10^{-7}$ М
Fig. 2. Dependence of stationary resistance of plasticized $[\text{Ag}(\text{Амох})_2]\text{DMDSA}$ from the concentration of EAS; C (primembrane) $1 \cdot 10^{-4} | 1 \cdot 10^{-7}$ М

На рис. 3 приведены зависимости сопротивления пластифицированных ПВХ-мембран на основе ассоциатов диметилдистеариламмония с комплексными соединениями серебро (I)-амоксициллин от времени.

Проведено модифицирование исследуемой мембраны на основе $[\text{Ag}(\text{Амох})_2]\text{ДМДСА}$ нанотрубками полианилина, т.е. синтез молекулярно-импринтированного полимера (МИП), селективных к амоксициллину на поверхности мембран. Темно-зеленый оттенок модифицированной мембраны свидетельствует о том, что МИП в ее составе находится в форме эмеральдина (рис. 4).

Полианилин и нанотрубки обладают хорошей проводимостью и за счет этого являются взаимодополняемыми материалами; при их сочетании установлен оптимальный эффект –

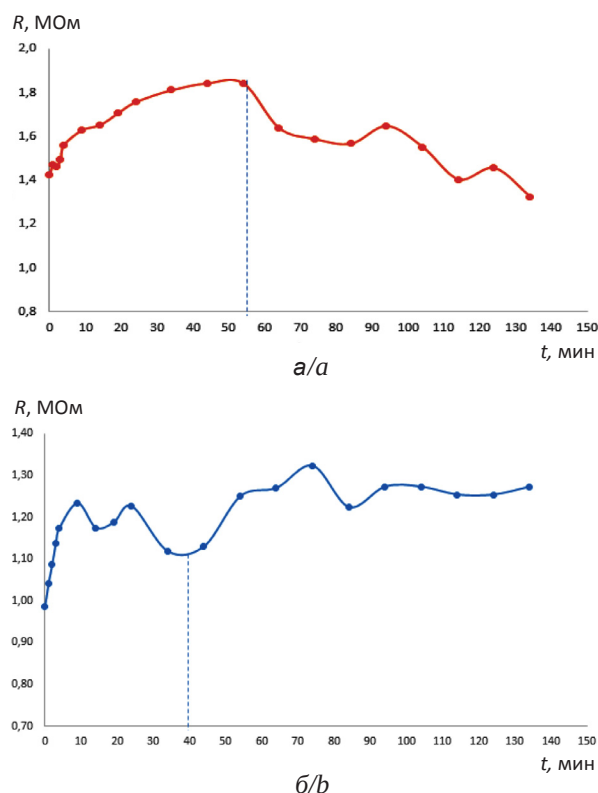


Рис. 3. Зависимость сопротивления амоксициллинселективных мембран от времени: а – $C_{ЭАВ}$ 2%, $1 \cdot 10^{-3} | 1 \cdot 10^{-7}$ М; б – $C_{ЭАВ}$ 4%, $1 \cdot 10^{-2} | 1 \cdot 10^{-7}$ М растворов амоксициллина
Fig. 3. Dependence of the resistance of amoxicillin-selective membranes on time: а – C_{EAS} 2%, $1 \cdot 10^{-3} | 1 \cdot 10^{-7}$ М; б – C_{EAS} 4%, $1 \cdot 10^{-2} | 1 \cdot 10^{-7}$ М aqueous solutions of amoxicillin



Рис. 4. Фотография исследуемой мембраны на основе $[\text{Ag}(\text{Амох})_2]\text{ДМДСА}$, модифицированной нанотрубками полианилина ($C_{ЭАВ}=2\%$)
Fig. 4. Photo of the investigated membrane based on $[\text{Ag}(\text{Амох})_2]\text{DMDSA}$ modified polyaniline nanotubes ($C_{EAS}=2\%$)

улучшение ионного транспорта через модифицированную мембрану, выраженное установлением стационарного сопротивления при динамическом равновесии в исследуемой системе. Показаны



результаты эксперимента (табл. 1), согласно которым можно резюмировать, что использование молекулярно-импринтированного полимера на основе нанотрубок полианилина в качестве мо-

дификатора позволяет снижать сопротивление мембран примерно в 1,5 раза для растворов с разным градиентом концентраций в отсеках электрохимической ячейки, разделяемых мембраной.

Таблица 1 / Table 1

Стационарные значения омических сопротивлений мембран на основе [Ag(Aмоx)₂]ДМДСА+PANI NT (n = 3, P = 0,95)

Stationary values of ohmic resistances of membranes based on [Ag(Aмоx)₂]DMDSA+PANI NT (n = 3, P = 0,95)

Концентрация примембранных растворов, М Concentration of primembrane aqueous environments, M	R_{stat} , МОм: до (1) и после (2) изменения поляризации R_{stat} , MOhm: before (1) and after (2) the polarization change	
	1	2
$1 \cdot 10^{-2}$ $1 \cdot 10^{-7}$	(1,28 ± 0,57)	(1,24 ± 0,55)
$1 \cdot 10^{-3}$ $1 \cdot 10^{-7}$	(1,53 ± 0,47)	(1,52 ± 0,57)
$1 \cdot 10^{-4}$ $1 \cdot 10^{-7}$	(1,77 ± 0,19)	(1,66 ± 0,52)

Приведены зависимости стационарного сопротивления от концентрации примембранных растворов ПВХ-мембран, модифицированных нанотрубками полианилина (рис. 5).

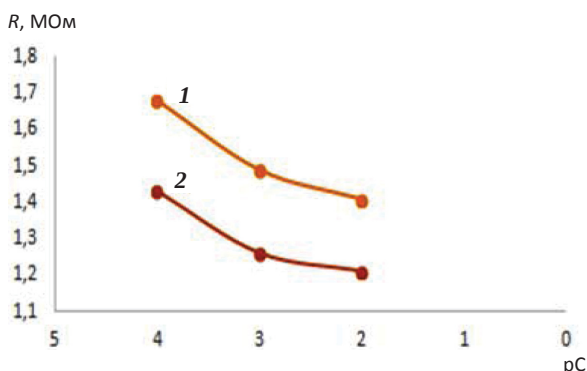


Рис. 5. Зависимость стационарного сопротивления мембран на основе [Ag(Aмоx)₂]ДМДСА+PANI NT от концентрации примембранных растворов амокцилина:

1 – до, 2 – после изменения поляризации

Fig. 5. Dependence of stationary resistance of membranes based on [Ag(Aмоx)₂]DMDSA+PANI NT from the concentration of primembrane aqueous solutions of amoxicillin:

1 – before, 2 – after the polarization change

Оценены количественные характеристики мембранного транспорта: коэффициент проницаемости и поток ионов [6, 16]. Коэффициент проницаемости P – количество вещества, проникающее через единицу поверхности мембраны, имеющей единичную толщину, в единицу времени при перепаде концентраций, равном единице. Поток ионов J – количество вещества, проходящего через единицу поверхности мембраны в единицу времени. Объёмные характеристики ионообменных мембран зависят от времени их контакта с растворами антибиотиков (рис. 6, а, б).

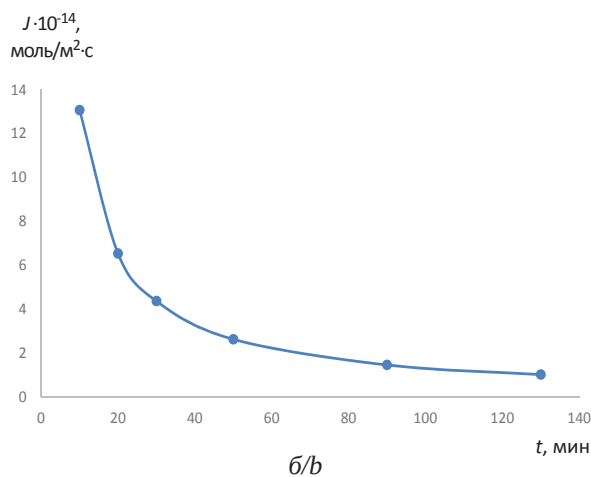
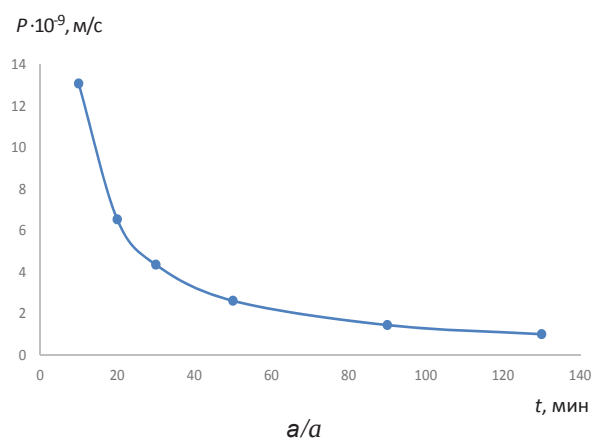


Рис. 6. Зависимости коэффициентов проницаемости (а) и потока иона (б) амокцилина от времени при концентрации примембранных растворов $1 \cdot 10^{-2}$ | $1 \cdot 10^{-7}$ М; ЭАВ: [Ag(Aмоx)₂]ДМДСА

Fig. 6. Dependences of the permeability coefficients (a) and the ion flux (b) of amoxicillin on time at the concentration of primembrane aqueous solutions $1 \cdot 10^{-2}$ | $1 \cdot 10^{-7}$ М; EAS: [Ag(Aмоx)₂]DMDSA



Коэффициент проницаемости мембраны, м/с:

$$P = \frac{\ln \frac{C_1 + C_2}{C_1 - C_2}}{S \left(\frac{1}{V_1} + \frac{1}{V_2} \right) t}$$

Поток ионов, моль/м²·с

$$J = P (C_2 - C_1),$$

где C_1, C_2 – концентрации растворов исследуемых веществ в источнике, приемнике, соответственно, моль/м³; S – рабочая площадь поверх-

ности мембраны, м²; t – время эксперимента, с; V_1 и V_2 – объем секции 1 (источника) и секции 2 (приёмника) соответственно, м³.

В табл. 2 приведены величины потоков ионов и коэффициентов проницаемости мембран для исследуемых растворов амоксициллина.

Проницаемость и поток ионов не являются постоянными характеристиками мембраны, они зависят от природы и типа диффундирующих частиц [6].

Таблица 2 / Table 2

Количественные характеристики мембранного транспорта (ЭАВ: [Ag(Амох)₂]ДМДСА+PANI NT,

$C_{ЭАВ} = 2\%$ ($n = 3, P = 0,95$)

Quantitative characteristics of membrane transport (EAS: [Ag(Амох)₂]DMDSA+PANI NT, $C_{EAS} = 2\%$ ($n = 3, P = 0,95$)

C_1, M	C_2, M	t, c t, s	V_1, m^3 V_1, m^3	V_2, m^3 V_2, m^3	S, m^2 S, m^2	$P, m/c$ $P, m/s$	$J, \text{моль/м}^2 \cdot \text{с}$ $J, \text{mol/m}^2 \cdot \text{s}$
$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-7}$	8040	$1,5 \cdot 10^{-6}$	$1,1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$(4,77 \pm 1,76) \cdot 10^{-9}$	$(4,77 \pm 1,76) \cdot 10^{-14}$
$1 \cdot 10^{-3}$						$(3,90 \pm 0,40) \cdot 10^{-9}$	$(3,90 \pm 0,40) \cdot 10^{-15}$
$1 \cdot 10^{-4}$						$(1,06 \pm 0,25) \cdot 10^{-9}$	$(1,06 \pm 0,25) \cdot 10^{-17}$

Таким образом, изучены транспортные свойства немодифицированных и модифицированных нанотрубками полианилина пластифицированных поливинилхлоридных мембран. Установлено влияние концентрации примембранных растворов антибиотиков на транспортные свойства. Оценены количественные характеристики мембранного транспорта пластифицированной амоксициллинселективной мембраны на основе ассоциатов диметилдистеариламмония с комплексными соединениями серебро (I) – амоксициллин ([Ag(Амох)₂]ДМДСА): коэффициент проницаемости и поток ионов, которые численно различаются на 5–8 порядков.

Список литературы

1. Юшкин А. А., Бальнин А. В., Нехаев А. И., Волков А. В. Разделение асфальтенов типа «архипелаг» и «континент» на ультрафильтрационных мембранах // Мембраны и мембр. технол. 2021. Т. 11, № 2. С. 155–162.
2. Strathmann H., Grabowski A., Eigenberger G. Ion-exchange membranes in the chemical process industry // Ind. Eng. Chem. Res. 2013. Vol. 52, № 31. P. 10364–10379. <https://doi.org/10.1021/ie4002102>
3. Agrawal R. C., Mahipal Y. K., Ashrafi R. Materials and ion transport property studies on hot-press casted solid polymer electrolyte membranes: [(1-x) PEO: x KIO₃] //

Solid State Ionics. 2010. Vol. 192. P. 6–8. <https://doi.org/10.1016/j.ssi.2010.05.048>

4. Волков В. И., Волков Е. В., Тимофеев С. В., Сангинов Е. А., Павлов А. А., Сафронова Е. Ю., Стенина И. А., Ярославцев А. Б. Самодиффузия воды и ионная проводимость в перфторированных сульфокатионных мембранах МФ-4СК // Журн. неорг. химии. 2010. Т. 55, № 3. С. 355–357. <https://doi.org/10.1134/S0036023610030010>
5. Ачох А. Р., Заболоцкий В. И., Лебедев К. А., Шарфган М. В., Ярославцев А. Б. Электрохимические свойства и селективность двухслойных ионообменных мембран в тернарных растворах сильных электролитов // Мембраны и мембр. технол. 2021. Т. 11, № 1. С. 58–78.
6. Кулапина Е. Г., Погорелова Е. С., Кулапина О. И., Макарова Н. М., Мурсалов Р. К., Анкина В. Д. Ионный транспорт различных веществ в полимерных и биологических мембранах. Саратов : Саратовский источник, 2020. 111 с.
7. Galama A. H., Vermaas D. A., Veerman J., Saakes M., Rijnaarts H. H. M., Post J. W., Nijmeijer K. Membrane resistance: The effect of salinity gradients over a cation exchange membrane // J. Membr. Sci. 2014. Vol. 467. P. 279–291. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2014.05.046>
8. Galama A. H., Hoog N. A., Yntema D. R. Method for determining ion exchange membrane resistance for electrodialysis systems // Desalination. 2016. Vol. 380. P. 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2015.11.018>



9. Глебова Н. В., Краснова А. О., Томасов А. А., Зеленина Н. К., Нечитайлов А. А. Ионный транспорт в пористых электродах со смешанной проводимостью // Журн. техн. физики. 2017. Т. 87, № 6. С. 880–883.
10. Шапошник В. А. Сопряженный перенос ионов и теплоты через катионообменную мембрану при электродиализе малорастворимых электролитов // Сорбц. и хроматогр. процессы. 2019. Т. 19, № 2. С. 187–191. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2019.19/737>
11. Гельферих Ф. Иониты (основы ионного обмена). М.: Изд-во иностр. лит., 1962. 492 с.
12. Харитонов С. В. Транспортные свойства селективных мембран, обратимых к катионам азотсодержащих органических оснований: проницаемость и поток ионов // Журн. аналит. химии. 2003. Т. 58, № 2. С. 199–206.
13. Снесарев С. В. Потенциометрические сенсоры на основе комплексов серебра(I) с некоторыми β-лактамами антибиотиками и катионами тетраалкиламмония: дис. ... канд. хим. наук. Саратов, 2012. 207 с.
14. Березина Н. П., Кубайси А. А. Р., Стенина И. А., Смолка Р. В., Тимофеев С. В. Протон-электронная проводимость и структура композитных мембран МФ-4СК, модифицированных полианилином или платиной // Мембраны. Сер. Критические технологии. 2006. № 4 (32). С. 48–55.
15. Яцишин М. Н., Бойчишин Л. М., Демчина И. И., Носенко В. К. Электрохимическое окисление анилина на поверхности аморфного металлического сплава $Al_{87}Ni_{8}Cu_5$ // Электрохимия. 2012. Т. 48, № 5. С. 551–558.
16. Кулапина Е. Г., Тютликова М. С., Мурсалов Р. К. Транспортные свойства мембран на основе ассоциатов тетрадециламмония с комплексными соединениями серебра(I)-цефотаксим // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2019. Т. 19, вып. 2. С. 138–145. <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2019-19-2-138-145>
17. Титорова В. Д., Сарапулова В. В., Кириченко Е. В., Кириченко К. А. Оценка электропроводности и генерации ионов H^+ и OH^- мембраны МК-40, модифицированной слоем полиэтиленimina, на основании анализа хронопотенциограмм // Мембраны и мембр. технол. 2020. Т. 10, № 6. С. 380–392.
18. Иванов А. Е., Зубов В. П. «Умные» полимеры как поверхностные модификаторы биоаналитических устройств и биоматериалов: теория и практика // Успехи химии. 2016. Т. 85, № 6. С. 565–584.
19. Титова Т. С., Юрова П. А., Колганова Т. С., Стенина И. А., Паршина А. В., Бобрешова О. В., Ярославцев А. Б. Потенциометрические сенсоры на основе мембран NaFоп, модифицированных PEDOT, для определения прокаина, лидокаина и бупивакаина в водных растворах и фармацевтических препаратах // Журн. аналит. химии. 2020. Т. 75, № 8. С. 750–759.
20. Фазуллин Д. Д., Маврин Г. В., Шайхиев И. Г. Модифицированные мембраны ПТФЭ-ПАНИ для выделения нефтепродуктов из водомасляных эмульсий // Мембраны и мембр. технол. 2017. Т. 7, № 1. С. 57–64.
21. Юрова П. А., Стенина И. А., Ярославцев А. Б. Влияние на транспортные свойства катионообменных мембран МК-40 модификации перфторсульфополимером и оксидом церия // Электрохимия. 2020. Т. 56, № 6. С. 568–573. <https://doi.org/10.31857/S0424857020060158>
22. Khoiruddin K., Ariono D., Subagjo S. Surface modification of ion-exchange membranes: methods, characteristics and performance // J. Appl. Polym. Sci. 2017. Vol. 134, № 48. P. 45540. <https://doi.org/10.1002/app.45540>
23. Jiang W., Lin L., Xu X., Wang H., Xu P. Physicochemical and electrochemical characterization of cation-exchange membranes modified with polyethyleneimine for elucidating enhanced monovalent permselectivity of electro dialysis // J. Membr. Sci. 2019. Vol. 572. P. 545–556. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2018.11.038>
24. Губин А. С., Суханов П. Т., Санникова Н. Ю. Применение молекулярно импринтированного полимера для концентрирования 4-нитрофенола из водных сред // Журн. аналит. химии. 2019. Т. 74, № 7S. С. S16–S23.
25. Шумянцева В. В., Булко Т. В., Сиголаева Л. В. Полимерные матрицы с молекулярной памятью в качестве аффинных сорбентов для определения миоглобина как кардиомаркера острого инфаркта миокарда методом вольтамперометрии // Журн. аналит. химии. 2017. Т. 72, № 4. С. 357–362. <https://doi.org/10.1134/S106193481704013X>
26. Manfredini N., Ilare J., Invernizzi M. Polymer nanoparticles for the release of fragrances: how the physicochemical properties influence the adsorption on textile and the delivery of limonene // Ing. Eng. Chem. Res. 2020. Vol. 59, № 28. P. 12766–12773. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.0c02075>
27. Кулапина Е. Г., Мурсалов Р. К. Электроаналитические свойства планарных сенсоров в растворах амоксциллина // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2022. Т. 22, вып. 1. С. 16–25. <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2022-22-1-16-25>

References

1. Yushkin A. A., Balynin A. V., Nekhaev A. I., Volkov A. V. Separation of archipelago- and continent-type asphaltenes on ultrafiltration membranes. *Membr. Membr. Technol.*, 2021, vol. 11, no. 3, pp. 139–145 (in Russian). <https://doi.org/10.1134/S2517751621020098>
2. Strathmann H., Grabowski A., Eigenberger G. Ion-exchange membranes in the chemical process industry. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2013, vol. 52, no. 31, pp. 10364–10379. <https://doi.org/10.1021/ie4002102>



3. Agrawal R. C., Mahipal Y. K., Ashrafi R. Materials and ion transport property studies on hot-press casted solid polymer electrolyte membranes: [(1-x) PEO: x KIO₃]. *Solid State Ionics*, 2010, vol. 192, pp. 6–8. <https://doi.org/10.1016/j.ssi.2010.05.048>
4. Volkov V. I., Volkov E. V., Timofeev S. V., Sanginov E. A., Pavlov A. A., Safronova E. Yu., Stenina I. A., Yaroslavtsev A. B. Water self-diffusion and ionic conductivity in perfluorinated sulfocationic membranes MF-4SK. *Russ. J. of Inorg. Chem.*, 2010, vol. 55, no. 3, pp. 315–317 (in Russian). <https://doi.org/10.1134/S0036023610030010>
5. Achoh A. R., Zabolotsky V. I., Lebedev K. A., Sharafan M. V., Yaroslavtsev A. B. Electrochemical properties and selectivity of bilayer ion-exchange membranes in ternary solutions of strong electrolytes. *Membr. Membr. Technol.*, 2021, vol. 11, no. 3, pp. 52–71 (in Russian). <https://doi.org/10.1134/S2517751621010029>
6. Kulapina E. G., Pogorelova E. S., Kulapina O. A., Makarova N. M., Mursalov R. K., Ankina V. D. *Ionnyj transport razlichnyh veshchestv v polimernyh i biologicheskikh membranah* [Ion transport of various active substances on polymer and biological membranes]. Saratov, Saratovskiy istochnik Publ., 2020. 111 p. (in Russian).
7. Galama A. H., Vermaas D. A., Veerman J., Saakes M., Rijnaarts H. H. M., Post J. W., Nijmeijer K. Membrane resistance: The effect of salinity gradients over a cation exchange membrane. *J. Membr. Sci.*, 2014, vol. 467, pp. 279–291. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2014.05.046>
8. Galama A. H., Hoog N. A., Yntema D. R. Method for determining ion exchange membrane resistance for electrodialysis systems. *Desalination*, 2016, vol. 380, pp. 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2015.11.018>
9. Glebova N. V., Krasnova A. O., Tomasov A. A., Zeleznina N. K., Nechitailov A. A. Ion transport in porous electrodes with mixed conductivity. *Tech. Phys.*, 2017, vol. 62, no. 6, pp. 895–898 (in Russian). <https://doi.org/10.1134/S106378421706010X>
10. Shaposhnik V. A. Conjugate transfer of ions and heat through a cation-exchange membrane during electrodialysis of slight soluble electrolytes. *Sorb. and Chromatogr. Proc.*, 2019, vol. 19, no. 2, pp. 187–191 (in Russian). <https://doi.org/10.17308/sorpcrom.2019.19/737>
11. Gelferich F. *Ionity (osnovy ionnogo obmena)* [Ionites (fundamentals of ion exchange)]. Moscow, Izd-vo inostr. lit., 1962. 492 p. (in Russian).
12. Kharitonov S. V. Transport properties of selective membranes reversible to nitrogen-containing organic base cations: permeability and ion flow. *J. Anal. Chem.*, 2003, vol. 58, no. 2, pp. 176–182 (in Russian). <https://doi.org/10.1023/A:1022318424085>
13. Snesarev S. V. *Potenciometricheskie sensory na osnove kompleksov serebra(I) s nekotorymi β-laktamnymi antibiotikami i kationami tetraalkilammoniya* [Potentiometric sensors based on silver(I) complexes with some β-lactam antibiotics and tetraalkylammonium cations]. Dis. Cand. Sci. (Chem.). Saratov, 2012. 207 p. (in Russian).
14. Berezina N. P., Kubaysi A. A. R., Stenina I. A., Smolka R. V., Timofeev S. V. Proton-electron conductivity and structure of MF-4SK composite membranes modified with polyaniline or platinum. *Membranes. Ser. Critical Technologies*, 2006, no. 4 (32), pp. 48–55 (in Russian).
15. Yatsyshyn M. M., Boichyshyn L. M., Demchyna I. I., Nosenko V. K. Electrochemical oxidation of aniline on the surface of an amorphous metal alloy Al₈₇Ni₈Y₅. *Russ. J. Electrochem.*, 2012, vol. 48, no. 5, pp. 502–508 (in Russian). <https://doi.org/10.1134/S1023193512050138>
16. Kulapina E. G., Tyutlikova M. S., Mursalov R. K. Transport properties of membranes on the basis of tetradecylammonium associates with complex compounds silver(I)-cefotaxime. *Izvestiya of Saratov University. Chemistry. Biology. Ecology*, 2019, vol. 19, iss. 2, pp. 138–145 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2019-19-2-138-145>
17. Titorova V. D., Sarapulova V. V., Kirichenko E. V., Kirichenko K. A. Polyethylenimine-modified MK-40 membranes: estimating the electrical conductivity and generation of H⁺ and OH⁻ ions from potential transients. *Membr. Membr. Technol.*, 2020, vol. 10, no. 2, pp. 357–367 (in Russian). <https://doi.org/10.1134/S2517751620060086>
18. Ivanov A. E., Zubov V. P. Smart polymers as surface modifiers for bioanalytical devices and biomaterials: Theory and practice. *Russian Chem. Reviews*, 2016, vol. 85, no. 6, pp. 565–584 (in Russian). <https://doi.org/10.1070/RCR4567>
19. Titova T. S., Yurova P. A., Kolganova T. S., Stenina I. A., Parshina A. V., Bobreshova O. V. Potentiometric sensors based on Nafion membranes modified by PEDOT for determining procaine, lidocaine, and bupivacaine in aqueous solutions and pharmaceuticals. *J. Anal. Chem.*, 2020, vol. 75, no. 8, pp. 1072–1079 (in Russian). <https://doi.org/10.1134/S106193482008016X>
20. Fazullin D. D., Mavrin G. V., Shaikhiev I. G. Modified PTFE–PANI membranes for the recovery of oil products from aqueous oil emulsions. *Petroleum Chem.*, 2017, vol. 57, no. 2, pp. 165–171 (in Russian). <https://doi.org/10.1134/S2218117216040064>
21. Yurova P. A., Stenina I. A., Yaroslavtsev A. B. The effect of the cation-exchange membranes MK-40 modification by perfluorinated sulfopolymer and ceria on their transport properties. *Russ. J. Electrochem.*, 2020, vol. 56, no. 6, pp. 528–532 (in Russian). <https://doi.org/10.31857/S0424857020060158>
22. Khoiruddin K., Ariono D., Subagjo S. Surface modification of ion-exchange membranes: methods, characteristics and performance. *J. Appl. Polym. Sci.*, 2017, vol. 134, no. 48, p. 45540. <https://doi.org/10.1002/app.45540>
23. Jiang W., Lin L., Xu X., Wang H., Xu P. Physicochemical and electrochemical characterization



- of cation-exchange membranes modified with polyethyleneimine for elucidating enhanced monovalent permselectivity of electro dialysis. *J. Membr. Sci.*, 2019, vol. 572, pp. 545–556. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2018.11.038>
24. Gubin A. S., Sukhanov P. T., Sannikova N. Y., Proskuryakova E. D., Phrolova Yu. S. Use of molecularly imprinted polymer for the preconcentration of 4-nitrophenol from aqueous media. *J. Anal. Chem.*, 2019, vol. 74, no. 2, pp. 11–17 (in Russian). <https://doi.org/10.1134/S1061934819070116>
25. Shumyantseva V. V., Bulko T. V., Sigolaeva L. V., Kuzikov A. V., Archakov A. I. Polymer matrices with molecular memory as affine adsorbents for the determination of myoglobin as a cardiac marker of acute myocardial infarction by voltammetry. *J. Anal. Chem.*, 2017, vol. 72, no. 4, pp. 410–414 (in Russian) <https://doi.org/10.1134/S106193481704013X>
26. Manfredini N., Ilare J., Invernizzi M. Polymer nanoparticles for the release of fragrances: how the physicochemical properties influence the adsorption on textile and the delivery of limonene. *Ing. Eng. Chem. Res.*, 2020, vol. 59, no. 28, pp. 12766–12773. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.0c02075>
27. Kulapina E. G., Mursalov R. K. Electroanalytical properties of planar sensors in aqueous environments of amoxicillin. *Izvestiya of Saratov University. Chemistry. Biology. Ecology*, 2022, vol. 22, iss. 1, pp. 16–25 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2022-22-1-16-25>

Поступила в редакцию 24.11.21; одобрена после рецензирования 15.12.21; принята к публикации 17.12.21
The article was submitted 24.11.21; approved after reviewing 15.12.21; accepted for publication 17.12.21