



- факторов на транспортные свойства поливинилхлоридных пластифицированных мембран на основе полиоксиэтилированных нонилфенолов // Изв. Саратовского университета. Нов. сер. 2011. Т. 11. Сер. Химия. Биология. Экология, вып. 2. С. 18–25.
8. Холмберг К., Йонссон Б., Кронберг Б., Линдман Б. Поверхностно-активные вещества и полимеры в водных растворах / пер. с англ. Г. П. Ямпольской; под ред. Б. Д. Сумма. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2010. 528 с.
  9. Окунев А. Ю., Лагунов Н. И., Демченко С. Д. Наномембранные контакторные системы для разделения и очистки газовых смесей // Сборник тезисов докладов научно-технологических секций Международного форума по нанотехнологиям «Rusnanotech 08», Москва 3–5 декабря. М., 2008. С. 597–599.
  10. Ярославцев А. Б., Никоненко В. В., Заболоцкий В. И. Ионный перенос в мембранных и ионообменных материалах // Успехи химии. 2003. Т. 72, № 5. С. 438–470.
  11. Золотов Ю. А., Дорохова Е. Н., Фадеева В. И. и др. Основы аналитической химии: в 2 кн. Кн. 2. Методы химического анализа / под ред. Ю. А. Золотова. М.: Высшая школа, 2004. 503 с.

УДК 543.554.6:661.185

## ОСОБЕННОСТИ ДИФFUЗИИ ГОМОЛОГОВ АЛКИЛПИРИДИНИЯ ЧЕРЕЗ ПОЛИВИНИЛХЛОРИДНЫЕ МОЛЕКУЛЯРНЫЕ СИТА

Е. С. Погорелова, Е. Г. Кулапина, Н. М. Макарова

Саратовский государственный университет  
E-mail: jewel89@mail.ru, kulapinaeg@mail.ru



Исследован процесс переноса гомологов алкилпиридиния через поливинилхлоридные пластифицированные наночистратционные мембраны (молекулярные сита) в условиях самодиффузии и постоянного тока. Рассчитаны количественные характеристики мембранного транспорта: коэффициенты проницаемости, диффузии, распределения и поток ионов. Показана зависимость объёмных свойств наночистратционных мембран от длины углеводородного радикала гомологов алкилпиридиния в примембранных растворах и порообразователях.

**Ключевые слова:** соли алкилпиридиния, наночистратционные мембраны, диффузия, проницаемость, поток ионов, коэффициент распределения.

### Features of Alkylpyridinium Homologues Diffusion through PVC Molecular Sieves

E. S. Pogorelova, E. G. Kulapina, N. M. Makarova

The process of alkylpyridinium homologous transfer through polyvinylchloride plasticized nanofiltration membranes (molecular sieves) under self-diffusion and direct current conditions. Quantitative characteristics of membrane transport: the coefficients of permeability, diffusion, the distribution coefficient, ion flux, were calculated. The dependences of the volume properties of nanofiltration membranes from the hydrocarbon radical length in the alkylpyridinium homologous in membrane solutions and pore formers were shown.

**Key words:** alkylpyridinium salts, nanofiltration membranes, diffusion, permeability, ion flux, distribution coefficient.

### Введение

Исследование процессов массопереноса в полимерных материалах имеет существенное практическое и научное значение. Возможность

применения молекулярных сит для разделения гомологов синтетических ПАВ связана с их пропускающей способностью. Изучение транспорта веществ в полимерах позволяет судить о структуре данных материалов и характере движения макромолекул [1].

Массоперенос вещества через мембрану обусловлен разницей давлений, концентраций или температуры по обе стороны мембраны; движущей силой при этом является разница химических потенциалов. Механизм переноса зависит от структуры мембраны (размера пор), рН, температуры, давления растворов, размеров, природы, концентрации молекул диффундирующих веществ, ионной силы среды. Перенос низкомолекулярных веществ в полимерах определяется также гибкостью и своеобразным характером тепловых движений молекул [1–8].

Перенос вещества через мембрану последовательно проходит следующие стадии: диффузию через пограничный слой, адсорбцию вещества на поверхности мембраны, перенос через мембрану, десорбцию из мембраны, диффузию через пограничный слой с обратной стороны мембраны [9]. Для количественного описания массопереноса можно использовать следующие параметры: коэффициент диффузии ( $D$ ), проницаемость ( $P$ ), поток ионов ( $J$ ), коэффициент распределения ( $K$ ); расчётные формулы указанных величин представлены в работе [10].



В настоящем исследовании оценены объёмные характеристики наночелювтрационнх мембран на основе гомологов алкилпиридиния (коэффициенты диффузии, проницаемости, распределения и поток ионов) в условиях диффузионного массопереноса и постоянного тока, установлены их зависимости от времени, природы и концентрации диффундирующих веществ, природы порообразователей.

### Материалы и методы исследования

Для приготовления мембран и растворов использовались реагенты аналитической чистоты: гомологи алкилпиридиния (C<sub>10</sub>, C<sub>12</sub>, C<sub>16</sub>, C<sub>18</sub>) (Fluka), додецилсульфат натрия (Fluka), поливинилхлорид (ПВХ), дибутилфталат (ДБФ), циклогексанон, KCl, AgNO<sub>3</sub>. Формулы гомологов алкилпиридиния представлены в табл. 1.

Таблица 1

Названия и формулы гомологов алкилпиридиния

Наименование	Сокращение	Формула	Молярная масса, г/моль	Содержание основного вещества, w, %
Децилпиридиний хлорид	ДП	[C <sub>10</sub> H <sub>21</sub> C <sub>5</sub> H <sub>5</sub> N] <sup>+</sup> Cl <sup>-</sup>	255,5	87
Додещилпиридиний бромид	ДДП	[C <sub>12</sub> H <sub>25</sub> C <sub>5</sub> H <sub>5</sub> N] <sup>+</sup> Br <sup>-</sup>	328,0	98
Цетилпиридиний хлорид	ЦП	[C <sub>16</sub> H <sub>33</sub> C <sub>5</sub> H <sub>5</sub> N] <sup>+</sup> Cl <sup>-</sup>	339,5	100
Октадецилпиридиний хлорид	ОДП	[C <sub>18</sub> H <sub>37</sub> C <sub>5</sub> H <sub>5</sub> N] <sup>+</sup> Cl <sup>-</sup>	367,5	99

Исходные 1·10<sup>-3</sup> М растворы поверхностно-активных веществ (ПАВ) готовили по точным навескам препаратов; рабочие растворы 1·10<sup>-4</sup> – 1·10<sup>-5</sup> М – последующим разбавлением.

Для приготовления ситовой композиции в бюкс помещали навески растворителя-пластификатора ДБФ и соответствующего ПАВ (ДП, ДДП, ЦП, ОДП), геометрические размеры молекул которого соответствовали размерам пор молекулярного сита; концентрация порообразователей – 1%. Затем при перемешивании на магнитной мешалке приливали 3–5 мл циклогексанона и постепенно прибавляли навеску ПВХ (ПВХ:ДБФ = 1:3). Перемешивание продолжали до полной гомогенизации смеси. Полученную

ситовую композицию выливали в чашку Петри и оставляли на 2–3 суток. После испарения растворителя образующуюся пленку помещали в стакан, содержащий 500 мл дистиллированной воды, и выдерживали в течение 7 суток, меняя воду каждые 24 ч. Для интенсификации процесса вымывания ПАВ из полимерной матрицы стакан с водой несколько раз подогревали до 60–70 °С [11].

Исследование процессов диффузионного массопереноса проводили в ячейке собственной конструкции, состоящей из двух отделений (в одном (источник) – раствор соли алкилпиридиния, в другом (приёмник) – дистиллированная вода), между которыми располагалась наночелювтрационная мембрана (рис.1).

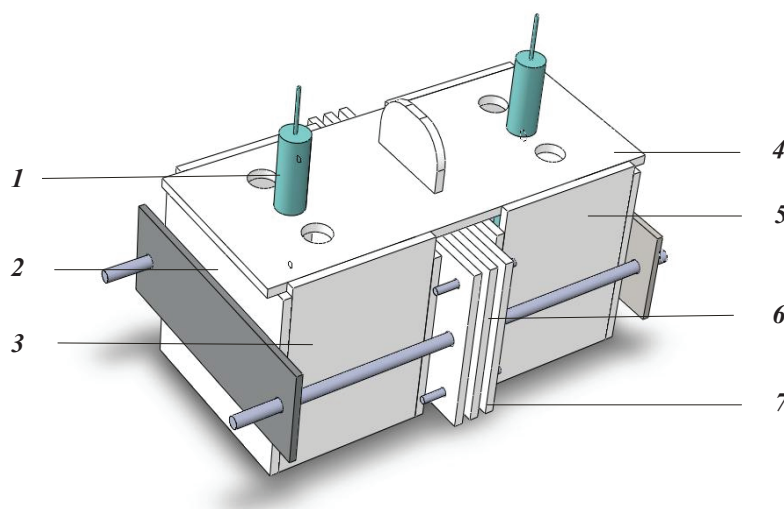


Рис. 1. Ячейка для изучения транспортных свойств мембран: 1 – платиновые электроды, 2 – сосуд из плексигласа, 3 – источник, V = 330 мл, 4 – крышка, 5 – приёмник, V = 330 мл, 6 – молекулярное сито, 7 – скрепляющие пластины



Исследования объемных свойств мембран при постоянном токе проводились с использованием четырехэлектродной схемы, состоящей из пары платиновых (токопроводящих) и пары хлорид-серебряных (регистрирующих) электродов. Напряжение на мембране при прохождении тока регистрировали с помощью двух электродов сравнения, подключенных к высокоомному вольтметру В7-26. Источником поляризации служил гальваностат. Для контроля величины силы тока в цепи нами использовался микроамперметр М244 [12].

Изменения концентраций алкилпиридиния в источнике и приёмнике измеряли через 30, 90, 150, 210 мин после начала эксперимента при диффузионном массопереносе и через 30, 60, 90, 150 мин – при постоянном токе (75 мкА). Определение концентрации гомологов алкилпиридиния в обеих секциях проводили методом потенциометрического титрования; титрант – додецилсульфат натрия. В качестве индикаторных использовали твердоконтактные КПАВ-сенсоры на основе додецилсульфата цетилпиридиния; соотношение ПВХ:ДБФ = 1:3,  $C_{ЭАК} = 1\%$  [11]. Перед работой электрод в течение суток выдерживали в  $10^{-3}$  М растворе хлорида цетилпиридиния.

Потенциометрические измерения проводили на иономере универсальном И-160 с погрешностью  $\pm 1$  мВ; электрод сравнения – хлоридсеребряный ЭВЛ-1МЗ.

### Результаты исследования

**Пропускающая способность молекулярных сит.** Проведены исследования переноса гомологов алкилпиридиния через молекулярные сита с различным диаметром пор при варьировании природы, концентрации контактирующих растворов, природы порообразователей.

Равновесие между растворами секций источника и приемника, обусловленное постоянством потоков гомологов алкилпиридиния через молекулярные сита, достигалось через 150 мин от начала эксперимента при диффузионном массопереносе и через 90 мин в условиях постоянного тока (рис. 2). В системе, где перенос гомологов алкилпиридиния осуществляется под действием постоянного тока, в приёмник переходит в 1,5–5 раз большее количество вещества, чем при диффузионном массопереносе. Это, вероятно, связано с упорядоченным движением ионов алкилпиридиния под действием тока, что, в свою очередь, приводит к снижению «забивания» поровых отверстий и адсорбции КПАВ на поверхности мембраны (табл. 2).

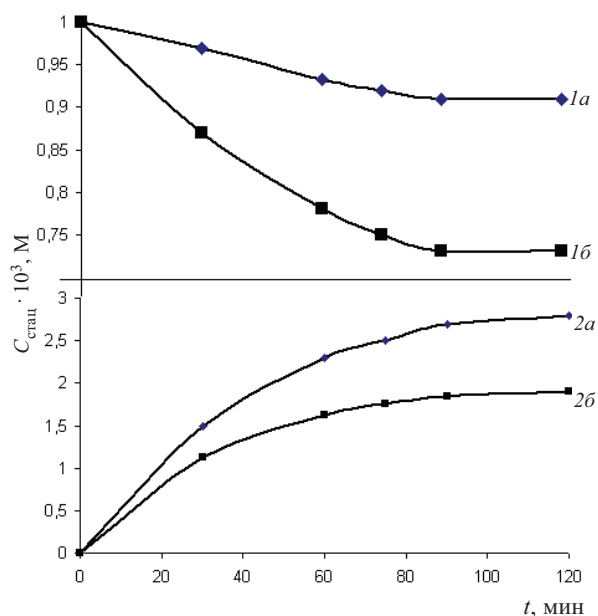


Рис. 2. Изменение концентрации ЦП в источнике (1) и приёмнике (2) от времени (порообразователь ЦП;  $C_{исх} = 1 \cdot 10^{-3}$  М); а –  $I = 75$  мкА; б – диффузионный массоперенос

Пропускающая способность молекулярных сит зависит от размеров ионов проникающих веществ (рис. 3). Так, в приёмник в большей степени попадают те гомологи, размеры которых меньше или сопоставимы с размерами порообразователей. Гомологи алкилпиридиния, размеры которых больше размеров порообразователей, проникают в приёмник в небольших количествах: до 1% от исходной концентрации в условиях диффузионного массопереноса и до 2,5% при постоянном токе.

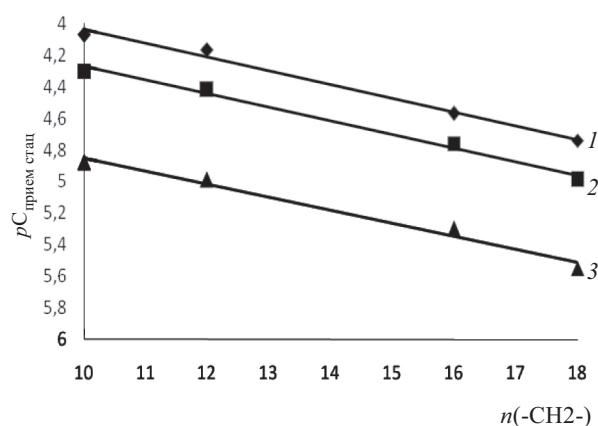


Рис. 3. Зависимость концентраций гомологов алкилпиридиния в приёмнике от числа метиленовых звеньев в условиях установившегося равновесия;  $C_{исх}$ , М:  $1 \cdot 10^{-3}$  М (1),  $5 \cdot 10^{-4}$  М (2),  $1 \cdot 10^{-4}$  М (3);  $I = 75$  мкА; порообразователь ЦП



Таблица 2

Концентрации гомологов алкилпиридиния в источнике, приёмнике и сорбированных мембраной ( $n = 3; p = 0,95$ )

Порообразователь	Переносимое вещество	$C_{исх}, M$	Диффузионный массоперенос				$I = 75 \text{ мксА}$			
			$C_{истр}, M$	$C_{прйм}, M$	$W_{сорб}, \%$	$C_{истр}, M$	$C_{прйм}, M$	$W_{сорб}, \%$		
ДП	ДДП	$1 \cdot 10^{-3}$	$(0,93 \pm 0,01) \cdot 10^{-3}$	$(1,10 \pm 0,05) \cdot 10^{-5}$	$5,7 \pm 0,6$	$(0,95 \pm 0,01) \cdot 10^{-3}$	$(2,00 \pm 0,07) \cdot 10^{-5}$	$3,50 \pm 0,04$		
	ЦП	$1 \cdot 10^{-3}$	—	—	—	$(0,98 \pm 0,01) \cdot 10^{-3}$	$(1,11 \pm 0,05) \cdot 10^{-6}$	$1,70 \pm 0,03$		
ДДП	ДП	$1 \cdot 10^{-3}$	$(0,82 \pm 0,05) \cdot 10^{-3}$	$(2,24 \pm 0,06) \cdot 10^{-5}$	$16,0 \pm 0,9$	$(0,89 \pm 0,04) \cdot 10^{-3}$	$(3,80 \pm 0,08) \cdot 10^{-5}$	$7,50 \pm 0,05$		
		$5 \cdot 10^{-4}$	$(4,13 \pm 0,07) \cdot 10^{-4}$	$(1,32 \pm 0,06) \cdot 10^{-5}$	$14,8 \pm 0,8$	$(4,45 \pm 0,06) \cdot 10^{-4}$	$(2,30 \pm 0,07) \cdot 10^{-5}$	$6,50 \pm 0,05$		
		$1 \cdot 10^{-4}$	$(0,86 \pm 0,04) \cdot 10^{-4}$	$(0,29 \pm 0,04) \cdot 10^{-5}$	$11,0 \pm 0,8$	$(0,91 \pm 0,01) \cdot 10^{-4}$	$(0,57 \pm 0,04) \cdot 10^{-5}$	$3,10 \pm 0,04$		
	ДДП	$1 \cdot 10^{-3}$	$(0,82 \pm 0,04) \cdot 10^{-3}$	$(1,67 \pm 0,05) \cdot 10^{-5}$	$17,7 \pm 0,7$	$(0,91 \pm 0,01) \cdot 10^{-3}$	$(2,62 \pm 0,07) \cdot 10^{-5}$	$6,38 \pm 0,04$		
		$5 \cdot 10^{-4}$	$(4,22 \pm 0,08) \cdot 10^{-4}$	$(0,69 \pm 0,04) \cdot 10^{-5}$	$14,3 \pm 0,8$	$(4,57 \pm 0,05) \cdot 10^{-4}$	$(1,62 \pm 0,06) \cdot 10^{-5}$	$5,34 \pm 0,06$		
		$1 \cdot 10^{-4}$	$(0,85 \pm 0,04) \cdot 10^{-4}$	$(0,15 \pm 0,03) \cdot 10^{-5}$	$13,6 \pm 0,8$	$(0,93 \pm 0,01) \cdot 10^{-4}$	$(0,41 \pm 0,04) \cdot 10^{-5}$	$2,60 \pm 0,04$		
ЦП	$1 \cdot 10^{-3}$	$(0,96 \pm 0,01) \cdot 10^{-3}$	$(1,80 \pm 0,05) \cdot 10^{-6}$	$3,5 \pm 0,5$	$(0,97 \pm 0,01) \cdot 10^{-3}$	$(9,0 \pm 0,8) \cdot 10^{-6}$	$2,30 \pm 0,04$			
		$5 \cdot 10^{-4}$	$(4,82 \pm 0,07) \cdot 10^{-4}$	$(1,10 \pm 0,03) \cdot 10^{-6}$	$3,4 \pm 0,3$	$(4,85 \pm 0,06) \cdot 10^{-4}$	$(4,84 \pm 0,07) \cdot 10^{-6}$	$2,03 \pm 0,05$		
	$1 \cdot 10^{-4}$	$(0,97 \pm 0,01) \cdot 10^{-4}$	$(0,29 \pm 0,04) \cdot 10^{-6}$	$3,0 \pm 0,5$	$(0,97 \pm 0,01) \cdot 10^{-4}$	$(1,16 \pm 0,05) \cdot 10^{-6}$	$1,64 \pm 0,03$			
		$1 \cdot 10^{-3}$	$(0,77 \pm 0,05) \cdot 10^{-3}$	$(3,60 \pm 0,06) \cdot 10^{-5}$	$19,4 \pm 0,8$	$(0,88 \pm 0,01) \cdot 10^{-3}$	$(6,83 \pm 0,08) \cdot 10^{-5}$	$5,20 \pm 0,06$		
ЦП	ДДП	$5 \cdot 10^{-4}$	$(3,85 \pm 0,07) \cdot 10^{-4}$	$(2,85 \pm 0,08) \cdot 10^{-5}$	$17,3 \pm 0,8$	$(4,44 \pm 0,06) \cdot 10^{-4}$	$(3,78 \pm 0,07) \cdot 10^{-5}$	$3,60 \pm 0,05$		
		$1 \cdot 10^{-4}$	$(0,79 \pm 0,04) \cdot 10^{-4}$	$(0,85 \pm 0,07) \cdot 10^{-5}$	$12,5 \pm 0,7$	$(0,89 \pm 0,01) \cdot 10^{-4}$	$(0,93 \pm 0,05) \cdot 10^{-5}$	$1,70 \pm 0,03$		
	$1 \cdot 10^{-3}$	$(0,78 \pm 0,04) \cdot 10^{-3}$	$(1,51 \pm 0,05) \cdot 10^{-5}$	$20,5 \pm 0,7$	$(0,91 \pm 0,01) \cdot 10^{-3}$	$(2,70 \pm 0,05) \cdot 10^{-5}$	$6,70 \pm 0,07$			
		$5 \cdot 10^{-4}$	$(3,95 \pm 0,07) \cdot 10^{-4}$	$(0,90 \pm 0,04) \cdot 10^{-5}$	$19,2 \pm 0,8$	$(4,59 \pm 0,06) \cdot 10^{-4}$	$(1,75 \pm 0,05) \cdot 10^{-5}$	$6,40 \pm 0,08$		
ОДП	ЦП	$1 \cdot 10^{-4}$	$(0,81 \pm 0,05) \cdot 10^{-4}$	$(2,45 \pm 0,05) \cdot 10^{-6}$	$16,6 \pm 0,5$	$(0,94 \pm 0,01) \cdot 10^{-4}$	$(5,0 \pm 0,8) \cdot 10^{-6}$	$5,65 \pm 0,05$		
		$1 \cdot 10^{-3}$	$(0,94 \pm 0,01) \cdot 10^{-3}$	$(0,90 \pm 0,03) \cdot 10^{-5}$	$4,8 \pm 0,4$	$(0,96 \pm 0,01) \cdot 10^{-3}$	$(1,80 \pm 0,05) \cdot 10^{-5}$	$2,50 \pm 0,04$		
	$5 \cdot 10^{-4}$	$(4,76 \pm 0,05) \cdot 10^{-4}$	$(5,45 \pm 0,06) \cdot 10^{-6}$	$3,7 \pm 0,3$	$(4,80 \pm 0,05) \cdot 10^{-4}$	$(10,2 \pm 0,7) \cdot 10^{-6}$	$1,96 \pm 0,03$			
		$1 \cdot 10^{-4}$	$(0,97 \pm 0,01) \cdot 10^{-4}$	$(1,10 \pm 0,04) \cdot 10^{-6}$	$2,4 \pm 0,3$	$(0,95 \pm 0,01) \cdot 10^{-4}$	$(2,80 \pm 0,05) \cdot 10^{-6}$	$0,80 \pm 0,03$		
ОДП	ДДП	$1 \cdot 10^{-3}$	$(0,81 \pm 0,01) \cdot 10^{-3}$	$(5,00 \pm 0,05) \cdot 10^{-5}$	$14,0 \pm 0,7$	$(0,87 \pm 0,01) \cdot 10^{-3}$	$(10,0 \pm 0,05) \cdot 10^{-5}$	$4,10 \pm 0,07$		
	ЦП	$1 \cdot 10^{-3}$	$(0,82 \pm 0,01) \cdot 10^{-3}$	$(1,7 \pm 0,6) \cdot 10^{-5}$	$16,3 \pm 0,8$	$(0,89 \pm 0,01) \cdot 10^{-3}$	$(3,20 \pm 0,05) \cdot 10^{-5}$	$7,80 \pm 0,08$		



**Коэффициент распределения.** Значение коэффициента распределения вещества в мембране ( $K$ ) рассчитывается как отношение концентраций растворов источника и приёмника при равновесных условиях [13].

Коэффициенты распределения гомологов алкилпиридиния больше единицы, т.е. они удерживаются молекулярными ситами. При увеличении концентрации исходных растворов алкилпиридиния коэффициенты распределения проявляют более высокие значения (табл. 3), так как усиливается сорбция ПАВ, эффект «закупоривания» поровых отверстий и стерический эффект. Таким образом, чем меньше количество вещества продифундирует в секцию приёмника, тем больше будет значение константы распределения, следовательно, при постоянном токе значения  $K$  в целом будут ниже, чем при диффузионном массопереносе.

**Проницаемость, поток ионов, коэффициент диффузии.** Физический смысл исследуемых величин:

– коэффициент проницаемости ( $P$ , м/с) – количество вещества, проникающее через единицу поверхности мембраны, имеющей единичную толщину, в единицу времени при перепаде концентраций, равном единице;

– поток вещества ( $J$ , моль/м<sup>2</sup>·с) – количество вещества, проходящего через единицу поверхности мембраны в единицу времени;

– коэффициент диффузии ( $D$ , м<sup>2</sup>/с) – количество вещества, проходящее при постоянной температуре в единицу времени через 1 м<sup>2</sup> по-

верхности мембраны при градиенте концентрации 1 моль/м<sup>3</sup> [14, 15].

В табл. 3 представлены рассчитанные количественные характеристики мембранного транспорта гомологов алкилпиридиния через молекулярные сита в условиях диффузионного массопереноса и постоянного тока при варьировании природы порообразователя, природы и концентрации растворов КПАВ в источнике.

В работе [10] было установлено, что с увеличением концентрации вещества в секции источника значение потока вещества возрастает из-за увеличения общего количества прошедшего сквозь наночистотационную мембрану вещества, а коэффициенты диффузии и проницаемости уменьшаются в связи с быстрой насыщаемостью мембраны («закупориванием» пор) и высокой скоростью адсорбции ПАВ на поверхности мембраны. При постоянном токе наблюдаются аналогичные тенденции (рис. 4), но величины рассматриваемых параметров мембранного транспорта проявляют большие значения. Линейность зависимостей объёмных параметров наночистотационных мембран от концентрации исходного раствора свидетельствует об упорядоченном движении ионов, переносимых КПАВ в условиях постоянного тока. Из-за уменьшения сорбции катионов алкилпиридиния коэффициенты проницаемости и диффузии показывают большие значения, а поток катионов – меньшие значения, чем при диффузионном массопереносе.

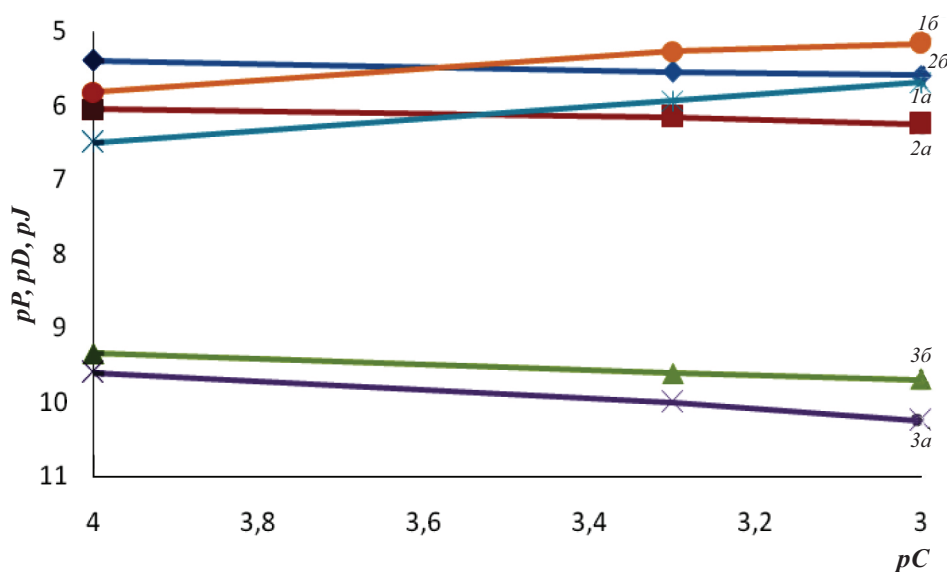


Рис. 4. Зависимости потока ДДП ( $I$ ), коэффициентов проницаемости ( $2$ ) и диффузии ( $3$ ) от концентрации исходного раствора;  $a$  – диффузионный массоперенос,  $b$  –  $I = 75$  мкА; порообразователь ЦП



Таблица 3  
Кoeffициенты диффузии, проницаемости, распределения и поток гомологов алкилпиридиния через нанofilь-трационные мембраны ( $n = 3; p = 0,95$ )

Порообразователь	Переносимое вещество	$S_{исх}, M$	Диффузионный массперенос			$I = 75 \text{ мкА}$				
			$P, \text{ м/с}$	$D, \text{ м}^2/\text{с}$	$J, \text{ моль/м}^2 \cdot \text{с}$	$K$	$P, \text{ м/с}$	$D, \text{ м}^2/\text{с}$	$J, \text{ моль/м}^2 \cdot \text{с}$	$K$
ДП	ДДП	$1 \cdot 10^{-3}$	$(3,9 \pm 0,5) \cdot 10^{-7}$	$(0,46 \pm 0,05) \cdot 10^{-11}$	$(3,6 \pm 0,6) \cdot 10^{-7}$	85 ± 9	$(7,1 \pm 0,8) \cdot 10^{-7}$	$(1,5 \pm 0,5) \cdot 10^{-11}$	$(6,6 \pm 0,7) \cdot 10^{-7}$	47 ± 6
	ЦП	$1 \cdot 10^{-3}$	—	—	—	—	$(3,9 \pm 0,7) \cdot 10^{-8}$	$(4,4 \pm 0,6) \cdot 10^{-13}$	$(3,8 \pm 0,5) \cdot 10^{-8}$	888 ± 20
ДДП	ДП	$1 \cdot 10^{-3}$	$(0,45 \pm 0,05) \cdot 10^{-6}$	$(1,2 \pm 0,5) \cdot 10^{-11}$	$(3,6 \pm 0,5) \cdot 10^{-7}$	37 ± 7	$(1,4 \pm 0,5) \cdot 10^{-6}$	$(5,9 \pm 0,7) \cdot 10^{-11}$	$(11,7 \pm 0,7) \cdot 10^{-7}$	23 ± 3
		$5 \cdot 10^{-4}$	$(0,59 \pm 0,06) \cdot 10^{-6}$	$(1,9 \pm 0,5) \cdot 10^{-11}$	$(2,9 \pm 0,4) \cdot 10^{-7}$	31 ± 8	$(1,7 \pm 0,5) \cdot 10^{-6}$	$(8,7 \pm 0,8) \cdot 10^{-11}$	$(7,0 \pm 0,8) \cdot 10^{-7}$	19 ± 3
	$1 \cdot 10^{-4}$	$(0,65 \pm 0,06) \cdot 10^{-6}$	$(2,2 \pm 0,6) \cdot 10^{-11}$	$(0,54 \pm 0,05) \cdot 10^{-7}$	29 ± 5	$(2,1 \pm 0,6) \cdot 10^{-6}$	$(13,2 \pm 0,8) \cdot 10^{-11}$	$(1,8 \pm 0,4) \cdot 10^{-7}$	16 ± 3	
	$1 \cdot 10^{-3}$	$(0,26 \pm 0,03) \cdot 10^{-6}$	$(0,49 \pm 0,05) \cdot 10^{-11}$	$(3,0 \pm 0,5) \cdot 10^{-7}$	49 ± 6	$(0,94 \pm 0,06) \cdot 10^{-6}$	$(2,7 \pm 0,5) \cdot 10^{-11}$	$(8,3 \pm 0,5) \cdot 10^{-7}$	35 ± 5	
	ДДП	$5 \cdot 10^{-4}$	$(0,34 \pm 0,04) \cdot 10^{-6}$	$(0,68 \pm 0,06) \cdot 10^{-11}$	$(1,4 \pm 0,4) \cdot 10^{-7}$	55 ± 7	$(1,2 \pm 0,4) \cdot 10^{-6}$	$(4,1 \pm 0,6) \cdot 10^{-11}$	$(5,2 \pm 0,7) \cdot 10^{-7}$	29 ± 6
	$1 \cdot 10^{-4}$	$(0,45 \pm 0,05) \cdot 10^{-6}$	$(0,94 \pm 0,08) \cdot 10^{-11}$	$(0,28 \pm 0,07) \cdot 10^{-7}$	58 ± 4	$(1,5 \pm 0,5) \cdot 10^{-6}$	$(6,6 \pm 0,7) \cdot 10^{-11}$	$(1,3 \pm 0,4) \cdot 10^{-7}$	23 ± 5	
	$1 \cdot 10^{-3}$	$(0,23 \pm 0,04) \cdot 10^{-7}$	$(0,28 \pm 0,04) \cdot 10^{-12}$	$(0,22 \pm 0,06) \cdot 10^{-7}$	811 ± 20	$(3,2 \pm 0,6) \cdot 10^{-7}$	$(3,0 \pm 0,6) \cdot 10^{-12}$	$(3,0 \pm 0,6) \cdot 10^{-7}$	108 ± 10	
	ЦП	$5 \cdot 10^{-4}$	$(0,26 \pm 0,03) \cdot 10^{-7}$	$(0,36 \pm 0,04) \cdot 10^{-12}$	$(0,13 \pm 0,05) \cdot 10^{-7}$	714 ± 20	$(3,4 \pm 0,6) \cdot 10^{-7}$	$(3,4 \pm 0,6) \cdot 10^{-12}$	$(1,6 \pm 0,5) \cdot 10^{-7}$	100 ± 20
	$1 \cdot 10^{-4}$	$(0,31 \pm 0,03) \cdot 10^{-7}$	$(0,53 \pm 0,05) \cdot 10^{-12}$	$(0,03 \pm 0,01) \cdot 10^{-7}$	594 ± 40	$(4,1 \pm 0,7) \cdot 10^{-7}$	$(4,9 \pm 0,7) \cdot 10^{-12}$	$(0,39 \pm 0,05) \cdot 10^{-7}$	84 ± 8	
	$1 \cdot 10^{-3}$	$(1,30 \pm 0,07) \cdot 10^{-6}$	$(6,09 \pm 0,06) \cdot 10^{-11}$	$(9,6 \pm 0,3) \cdot 10^{-7}$	21 ± 4	$(2,6 \pm 0,4) \cdot 10^{-6}$	$(2,0 \pm 0,5) \cdot 10^{-10}$	$(2,1 \pm 0,6) \cdot 10^{-6}$	13 ± 3	
ЦП	ДДП	$5 \cdot 10^{-4}$	$(2,11 \pm 0,04) \cdot 10^{-6}$	$(1,56 \pm 0,04) \cdot 10^{-10}$	$(7,5 \pm 0,5) \cdot 10^{-7}$	13 ± 4	$(2,9 \pm 0,5) \cdot 10^{-6}$	$(2,4 \pm 0,5) \cdot 10^{-10}$	$(1,2 \pm 0,4) \cdot 10^{-6}$	12 ± 4
		$1 \cdot 10^{-4}$	$(3,09 \pm 0,08) \cdot 10^{-6}$	$(3,33 \pm 0,08) \cdot 10^{-10}$	$(2,2 \pm 0,3) \cdot 10^{-7}$	10 ± 2	$(4,0 \pm 0,5) \cdot 10^{-6}$	$(4,6 \pm 0,7) \cdot 10^{-10}$	$(0,32 \pm 0,05) \cdot 10^{-6}$	9 ± 1
	$1 \cdot 10^{-3}$	$(0,54 \pm 0,06) \cdot 10^{-6}$	$(1,04 \pm 0,04) \cdot 10^{-11}$	$(4,1 \pm 0,5) \cdot 10^{-7}$	52 ± 7	$(0,97 \pm 0,06) \cdot 10^{-6}$	$(2,9 \pm 0,6) \cdot 10^{-11}$	$(8,5 \pm 0,7) \cdot 10^{-7}$	34 ± 6	
	ЦП	$5 \cdot 10^{-4}$	$(0,64 \pm 0,05) \cdot 10^{-6}$	$(1,46 \pm 0,05) \cdot 10^{-11}$	$(2,5 \pm 0,4) \cdot 10^{-7}$	44 ± 5	$(1,3 \pm 0,5) \cdot 10^{-6}$	$(4,9 \pm 0,6) \cdot 10^{-11}$	$(5,4 \pm 0,7) \cdot 10^{-7}$	26 ± 4
ОДП	ЦП	$1 \cdot 10^{-4}$	$(0,88 \pm 0,06) \cdot 10^{-6}$	$(2,65 \pm 0,05) \cdot 10^{-11}$	$(6,9 \pm 0,4) \cdot 10^{-8}$	33 ± 4	$(1,8 \pm 0,5) \cdot 10^{-6}$	$(10,2 \pm 0,8) \cdot 10^{-11}$	$(1,6 \pm 0,1) \cdot 10^{-7}$	18 ± 3
		$1 \cdot 10^{-3}$	$(2,09 \pm 0,08) \cdot 10^{-7}$	$(2,4 \pm 0,5) \cdot 10^{-12}$	$(2,02 \pm 0,06) \cdot 10^{-7}$	89 ± 7	$(6,6 \pm 0,8) \cdot 10^{-7}$	$(12,4 \pm 0,9) \cdot 10^{-12}$	$(6,2 \pm 0,7) \cdot 10^{-7}$	82 ± 7
	$5 \cdot 10^{-4}$	$(2,48 \pm 0,08) \cdot 10^{-7}$	$(3,5 \pm 0,7) \cdot 10^{-12}$	$(1,21 \pm 0,06) \cdot 10^{-7}$	73 ± 7	$(7,3 \pm 0,7) \cdot 10^{-7}$	$(15,7 \pm 0,9) \cdot 10^{-12}$	$(3,4 \pm 0,6) \cdot 10^{-7}$	46 ± 5	
	$1 \cdot 10^{-4}$	$(2,54 \pm 0,07) \cdot 10^{-7}$	$(3,7 \pm 0,7) \cdot 10^{-12}$	$(0,22 \pm 0,04) \cdot 10^{-7}$	67 ± 6	$(10,0 \pm 0,8) \cdot 10^{-7}$	$(29,7 \pm 0,9) \cdot 10^{-12}$	$(0,93 \pm 0,08) \cdot 10^{-7}$	34 ± 4	
ОДП	ДДП	$1 \cdot 10^{-3}$	$(1,8 \pm 0,5) \cdot 10^{-6}$	$(1,1 \pm 0,4) \cdot 10^{-10}$	$(1,4 \pm 0,4) \cdot 10^{-6}$	16 ± 3	$(3,5 \pm 0,5) \cdot 10^{-6}$	$(3,6 \pm 0,5) \cdot 10^{-10}$	$(2,7 \pm 0,5) \cdot 10^{-6}$	9 ± 1
	ЦП	$1 \cdot 10^{-3}$	$(6,0 \pm 0,7) \cdot 10^{-7}$	$(1,3 \pm 0,5) \cdot 10^{-11}$	$(4,9 \pm 0,6) \cdot 10^{-7}$	48 ± 5	$(11,5 \pm 0,8) \cdot 10^{-7}$	$(4,2 \pm 0,6) \cdot 10^{-11}$	$(9,9 \pm 0,7) \cdot 10^{-7}$	28 ± 4





Низкие значения потока вещества связаны с тем, что в отсутствии тока в источнике остаётся 70–85%\* вещества, а в процессе переноса участвуют оставшиеся 15–30%, часть из которых сорбируется мембраной, и часть переходит в приёмник, но при постоянном токе в источнике остаётся большее количество вещества: 87–94%, и соответственно в процессе переноса участвует только 6–13%.

Поскольку рассматриваемые параметры мембранного транспорта характеризуются количеством вещества, прошедшим через мембрану, то с увеличением размеров катионов алкилпиридиния в исходном растворе уменьшается количество алкилпиридиния, перешедшего в приёмник, и коэффициенты диффузии и проницаемости и поток катионов соответственно снижаются (табл. 3).

### Выводы

Таким образом, исследованы объёмные параметры массопереноса (коэффициенты диффузии, проницаемости, распределения и поток катионов) гомологов алкилпиридиния через поливинилхлоридные пластифицированные нанофильтрационные мембраны в условиях диффузионного массопереноса и постоянного тока. Установлены зависимости указанных параметров от размеров гомологов алкилпиридиния, их концентрации в исходном растворе.

### Список литературы

1. *Рейтлингер С. А.* Проницаемость полимерных материалов. М. : Химия, 1974. 272 с.
2. *Garcia-Aleman J., Dickson J., Mika A.* Experimental analysis, modeling, and theoretical design of McMaster pore-filled nanofiltration membranes // *J. Membr. Sci.* 2004. Vol. 240, № 1–2. P. 237–255.
3. *Петельский М. Б., Абрамзон А. А.* Особенности диффузии поверхностно-активных веществ через пористую мембрану // *Журн. физ. химии.* 1999. Т. 73, № 6. С. 1085–1088.
4. *Valadez-Blanco R., Livingston A.G.* Solute molecular transport through polyimide asymmetric organic solvent nanofiltration (OSN) membranes and the effect of membrane-formation parameters on mass transfer // *J. of Membrane Science.* 2009. Vol. 326. P. 332–342.
5. *Zhang W., Li J., Chen G., You W., Ren Zh.* Simulations of solute concentration profile and mass transfer behavior near the membrane surface with finite volume method // *J. of Membrane Science.* 2010. Vol. 355. P. 18–27.
6. *Follain N., Valleton J.-M., Lebrun L., Alexandre B., Schaezel P., Metayer M., Marais S.* Simulation of kinetic curves in mass transfer phenomena for a concentration-dependent diffusion coefficient in polymer membranes // *J. of Membrane Science.* 2010. Vol. 349. P. 195–207.
7. *Xue L., Borodin O., Smith G. D.* Modeling of enhanced penetrant diffusion in nanoparticle-polymer composite membranes // *J. of Membrane Science.* 2006. Vol. 286. P. 293–300.
8. *Liu L., Chakma A., Feng X.* Sorption, diffusion and permeation of light olefins in poly (ether block amide) membranes // *Chemical Engineering Science.* 2006. Vol. 61. P. 6142–6153.
9. *Морф В.* Принципы работы ионселективных электродов и мембранный транспорт. М. : Мир, 1985. 280 с.
10. *Кулапина Е. Г., Макарова Н. М., Погорелова Е. С., Михалева О. В., Шамина М. Н.* Влияние различных факторов на транспортные свойства поливинилхлоридных пластифицированных мембран на основе полиоксипропилированных нонилфенолов // *Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер.* 2011. Т. 11. Сер. Химия. Биология. Экология, вып. 2. С. 18–25.
11. *Кулапина Е. Г., Чернова Р. К., Кулапин А. И.* Потенциометрические сенсоры для определения синтетических поверхностно-активных веществ. Саратов : Наука, 2008. 179 с.
12. *Кулапина Е. Г., Михалева О. В., Макарова Н. М.* Транспортные свойства нанофильтрационных пластифицированных поливинилхлоридных мембран (молекулярных сит) // *ЖАХ.* 2008. Т. 63, № 5. С. 467–473.
13. *Золотов Ю. А., Дорохова Е. Н., Фадеева В. И. и др.* Основы аналитической химии : в 2 кн. Кн. 2. Методы химического анализа / под ред. Ю. А. Золотова. М. : Высшая школа, 2004. 503 с.
14. *Дубяга В. П., Перепечкин Л. П., Катаевский Е. Е.* Полимерные мембраны. М. : Химия, 1981. 232 с.
15. *Кухлинг Х.* Справочник по физике : пер с нем. М. : Мир, 1985. 520 с.

\* Рассматриваются только те гомологи алкилпиридиния, размеры которых меньше или сопоставимы с размерами пор молекулярного сита.