

ВЛИЯНИЕ ПРИРОДЫ КОМПОНЕНТОВ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ИХ ИММОБИЛИЗАЦИИ НА ПОВЕРХНОСТИ ПОРИСТЫХ МЕМБРАН НА ОСНОВЕ СУЛЬФОНАТСОДЕРЖАЩЕГО СОПОЛИАМИДА

© Н. Н. Смирнова

Владимирский государственный университет
им. Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых,
600000, г. Владимир, ул. Горького, д. 87
E-mail: smirnovann@list.ru

Поступила в Редакцию 28 января 2020 г.

После доработки 3 августа 2020 г.

Принята к публикации 14 августа 2020 г.

Изучен адсорбционный способ иммобилизации компонентов различной природы на поверхности ультрафильтрационных мембран на основе ароматического сополиамида, включающего 5 и 10 мол% звеньев с сульфонатными группами [ПА-5(-) и ПА-10(-)]. Компонентами иммобилизации являлись ионы меди(II), гистидин, лизин и 3,6-диамино-10-метилакридин хлорид. Показано, что иммобилизация в основном происходит за счет электростатического взаимодействия соответствующих функциональных групп компонента и сополиамида. Максимальная экспериментальная адсорбционная емкость образцов ПА-5(-) и ПА-10(-) по катионам меди(II), гистидину, лизину и 3,6-диамино-10-метилакридин хлориду составила 0.42 и 0.87, 1.12 и 1.79, 0.74 и 1.30, 0.63 и 1.07 мкмоль·см⁻² соответственно. Устойчивость иммобилизации компонентов исследовали в статическом и динамическом режимах. Установлено, что устойчивость фиксации активного компонента на поверхности носителя в значительной степени определяется природой лиганда. Показано, что для рассматриваемых систем и выбранного типа иммобилизации компонентов ее устойчивость также зависит от pH, ионной силы и полярности среды. В нейтральной среде с концентрацией соли, не превышающей 10⁻³ моль·дм⁻³, все изученные системы иммобилизованный компонент/мембрана демонстрируют хорошую устойчивость. В максимально неблагоприятных условиях (в исследованных диапазонах изменения параметров фильтрационной среды) остаточная адсорбционная емкость мембраны ПА-10(-) по ионам меди(II), гистидину, лизину и 3,6-диамино-10-метилакридин хлориду равна 0.86, 1.25, 0.70 и 1.04 мкмоль·см⁻².

Ключевые слова: сульфонатсодержащий ароматический сополиамид; пористые мембраны; нековалентная иммобилизация; устойчивость модификации

DOI: 10.31857/S0044461821010096

Синтетические полимерные мембраны составляют основу современного рынка мембран [1, 2]. К преимущественно используемым в производстве мембран полимерам относятся: целлюлоза и ее производные, полисульфон и полиэфирсульфоны, полиэтилентерефталат, полиакрилонитрил, ароматические и алифатические полиамиды, полиимиды, поликарбонаты, полиэтилен и полипропилен, поливинилиденфторид, полисилоксаны [3]. По мнению ряда авторов, традиционные методы синтеза полимеров во многом исчерпали свои возможности, и вероятность появления продуктов с характеристиками, обеспечивающими существенное улучшение свойств материалов

на их основе (в том числе мембранных), значительно уменьшилась [4, 5]. В связи с этим модификацию полимерных материалов можно рассматривать как наиболее эффективный способ выхода из создавшейся ситуации [6, 7].

В случае мембран максимальную результативность при минимизации воздействия на структуру обеспечивает модификация поверхности. Ее целью может являться улучшение массообменных характеристик за счет изменения гидрофильности или электроповерхностных свойств, повышение биосовместимости, минимизация загрязнения, обеспечение биохимических или химических функциональных

возможностей и, наконец, просто улучшение эстетики внешнего вида мембраны [8–12].

Методы модификации поверхности мембран можно разделить на две большие группы: физические и химические [13, 14]. В первую группу входят термическая, ионно-лучевая, ионно-плазменная и радиационная обработка материалов, основу второй составляют окислительные реакции, прививочная полимеризация в формах grafting-to или grafting-from и иммобилизация активных компонентов. Последний метод является весьма привлекательным благодаря сочетанию универсальности, высокой специфичности и экономической целесообразности в силу относительной технологической простоты.

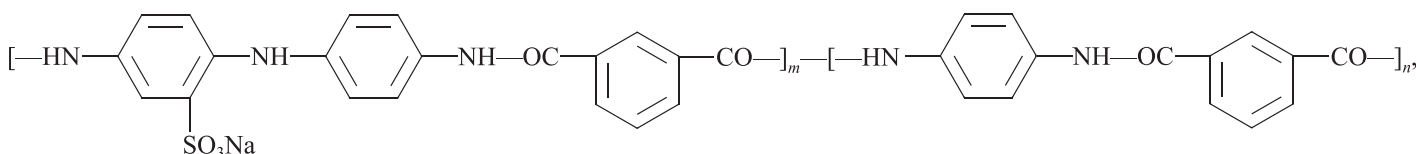
Иммобилизация компонентов может быть ковалентной или нековалентной. К основным способам осуществления нековалентной иммобилизации относят неспецифическую адсорбцию, ионное и афинное взаимодействие компонент/мембрана, хелатирование или связывание металлов. Выбор способа иммобилизации определяется как природой мембраны и компонента, так и характером решаемых с помощью создаваемой системы компонент/мембрана задач. Необходимо учитывать, что содержащая

ионные группы мембрана способна выполнять роль «активной» матрицы, так как регулирование количества ионных групп на поверхности представляется эффективным инструментом направленного контроля концентрации иммобилизованного компонента. Основной проблемой, возникающей при нековалентной иммобилизации компонента, является устойчивость модификации поверхности мембраны.

Цель работы — оценка влияния различных факторов на устойчивость иммобилизации на поверхности ультрафильтрационной мембраны на основе сульфатсодержащего ароматического сополиамида различающихся по своей природе компонентов. Компоненты для иммобилизации были выбраны из трех групп известных в аффинной хроматографии лигандов: катионы металлов, аминокислоты, красители.

Экспериментальная часть

Статистический сополимер на основе дихлорангидрида изофталевой кислоты и замещенных и незамещенных диаминов: натриевой соли 4,4'-диаминодифениламин-2-сульфокислоты и 1,4-фенилендиамина — синтезирован в ОАО «Полимерсинтез» [15]:



где $m = 10$, $n = 90$ мол% [ПА-10(-)]; $m = 5$, $n = 95$ мол% [ПА-5(-)].

Для получения мембран использовали сополимер со среднечисленной молекулярной массой $\sim 4.0 \cdot 10^4$.

Мембраны изготавливали фазоинверсионным методом мокрого формования. Для проведения исследований были получены образцы на подложке из нетканого полиэфирного материала с номинально отсекаемой молекулярной массой ~ 30 кДа. Компонентами иммобилизации являлись ионы меди(II), гистидин (His), лизин (Lys) и 3,6-диамино-10-метилакридин хлорид (Acg). Обработку мембран водными растворами сульфата меди(II) ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, ГОСТ 4165–78), гистидина (Sigma-Aldrich), лизина (Sigma-Aldrich) и 3,6-диамино-10-метилакридин хлорида (Sigma-Aldrich) проводили в статическом режиме. Были получены изотермы адсорбции компонентов при температуре, равной 25°C . Исследования проводили на образцах площадью 2 см^2 . Объем используемого для адсорбционного эксперимента раствора сульфата меди(II), гистидина, лизина и 3,6-диамино-10-метилакридин хлорида

соответствующей концентрации составлял 5 см^3 . Адсорбционные свойства мембран оценивали по изменению содержания компонентов в растворах после выдерживания в них образцов до установления равновесия. Адсорбционную емкость Q рассчитывали как отношение массы адсорбированного вещества к площади образца. Количество параллельных опытов составляло не меньше пяти. Результаты, описывающие экспериментальные данные, обрабатывали по теории ошибок. Доверительный интервал определяли для уровня значимости 0.05.

Для математической обработки экспериментальных данных применяли двухпараметрические модели адсорбции Ленгмюра (1) и Фрейндлиха (2) [16–18]:

$$Q = \frac{Q_m bc}{1 + bc}, \quad (1)$$

$$Q = K_F c^{1/n} \quad (2)$$

где Q — адсорбционная емкость мембраны ($\text{мг} \cdot \text{см}^{-2}$); c — равновесная концентрация компонента в растворе ($\text{мг} \cdot \text{дм}^{-3}$); Q_m — расчетное значение макси-

мальной адсорбции ($\text{мг}\cdot\text{см}^{-2}$); b — константа, характеризующая сродство в системе адсорбат/адсорбент ($\text{дм}^3\cdot\text{мг}^{-1}$); K_F — константа [$(\text{дм}^3)^{1/n}\cdot\text{мг}^{(1-1/n)}\cdot\text{см}^{-2}$]; n — безразмерный параметр, характеризующий интенсивность процесса адсорбции.

Для оценки степени соответствия экспериментальных данных выбранным математическим моделям использовали значения R^2 [17].

Содержание натрия в материалах определяли после сжигания навески массой 0.5–1.0 г в муфельной печи при температуре 800°C . Образовавшийся сухой остаток растворяли в бидистиллированной воде.

Концентрацию ионов натрия и меди в растворе определяли методом атомной абсорбционной спектроскопии (ААС) (спектрометр КВАНТ-Z.ЭТА). Для определения концентрации аминокислот и красителя использовали спектрофотометр СФ-2000. Оптическую плотность растворов фиксировали при длине волны λ , равной 210 и 469 нм соответственно.

Устойчивость иммобилизации компонентов исследовали в статическом и динамическом режимах. Для динамических исследований использовали тупиковую разделительную ячейку. Через мембрану при комнатной температуре под давлением 0.1 МПа фильтровали раствор с концентрацией хлорида калия $0.001\text{--}0.1$ моль·дм⁻³ и определенным рН. Для изменения рН в исследуемом диапазоне использовали растворы HCl и NaOH концентрацией 0.1 моль·дм⁻³. Контроль рН осуществляли с помощью рН-метра (ЭКСПЕРТ-001).

Объем фильтруемого раствора составлял 50 см³. Степень десорбции иммобилизованного компонента рассчитывали по формуле

$$W = \frac{Q_0 - Q_{\text{ост}}}{Q_0} \cdot 100\%, \quad (3)$$

где Q_0 и $Q_{\text{ост}}$ — начальная и остаточная адсорбционная емкость мембраны по компоненту соответственно ($\text{мг}\cdot\text{см}^{-2}$).

Перед проведением ультрафильтрационных десорбционных экспериментов образцы модифицированных мембран выдерживали в дистиллированной воде в течение 24 ч.

Обсуждение результатов

Полученные данные позволили оценить адсорбционную способность мембран по исследуемым компонентам (рис. 1). Математическая обработка результатов продемонстрировала предпочтительность применения для описания адсорбции в изученных системах модели Ленгмюра (табл. 1). Хорошее со-

ответствие экспериментальных изотерм адсорбции модели Фрейндлиха наблюдается при невысоких концентрациях компонентов в растворе. Максимальная экспериментальная адсорбционная емкость образцов ПА-5(-) и ПА-10(-) по катионам меди(II), гистидину, лизину и 3,6-диамино-10-метиалакридин хлориду равна 0.42 и 0.87, 1.12 и 1.79, 0.74 и 1.30, 0.63 и 1.07 мкмоль·см⁻² соответственно. Проведенные ранее исследования показали, что при наличии на поверхности мембраны сульфонатных групп и использовании в качестве компонентов иммобилизации ионов металлов и органических веществ с выраженными основными свойствами доминирующим механизмом иммобилизации является ионное связывание компонент/носитель [19].

По данным элементного анализа концентрация сульфонатных групп в полученных материалах составляет ~ 0.51 [ПА-5(-)] и ~ 0.94 мкмоль·см⁻² [ПА-10(-)]. Это с учетом стерической доступности ионных групп в мембранах свидетельствует о том, что иммобилизация органических компонентов на поверхности исследованных образцов происходит как за счет электростатических взаимодействий компонент/матрица, так и за счет сил неэлектростатической природы. В последнем случае речь идет прежде всего о гидрофобных взаимодействиях и водородных связях.

С учетом вышеизложенного и основываясь на результатах подробных исследований реакций с участием полимерных электролитов, в которых ионная сила, рН и полярность среды рассматриваются как основные факторы регулирования степени превращения [20–22], можно полагать, что именно эти факторы будут оказывать доминирующее влияние на устойчивость иммобилизации компонентов в рассматриваемых системах.

Результаты, полученные в ходе статических десорбционных исследований (табл. 2), позволяют выявить несколько закономерностей. Во-первых, в нейтральной среде с концентрацией хлорида калия, не превышающей 10^{-3} моль·дм⁻³, все рассматриваемые системы иммобилизованный компонент/мембрана демонстрируют хорошую устойчивость [степень десорбции не превышает 1%, за исключением ПА-10(Lys)]. Во-вторых, в случае использования в качестве компонента иммобилизации аминокислот, степень протонирования аминогрупп которых зависит от рН среды, именно этот фактор является основным, определяющим прочность их фиксации на подложке. Для ПА-10(His) при рН 9, т. е. выше изоэлектрической точки аминокислоты ($pI_{\text{His}} 7.7$), степень десорбции компонента увеличивается до 14–17%.

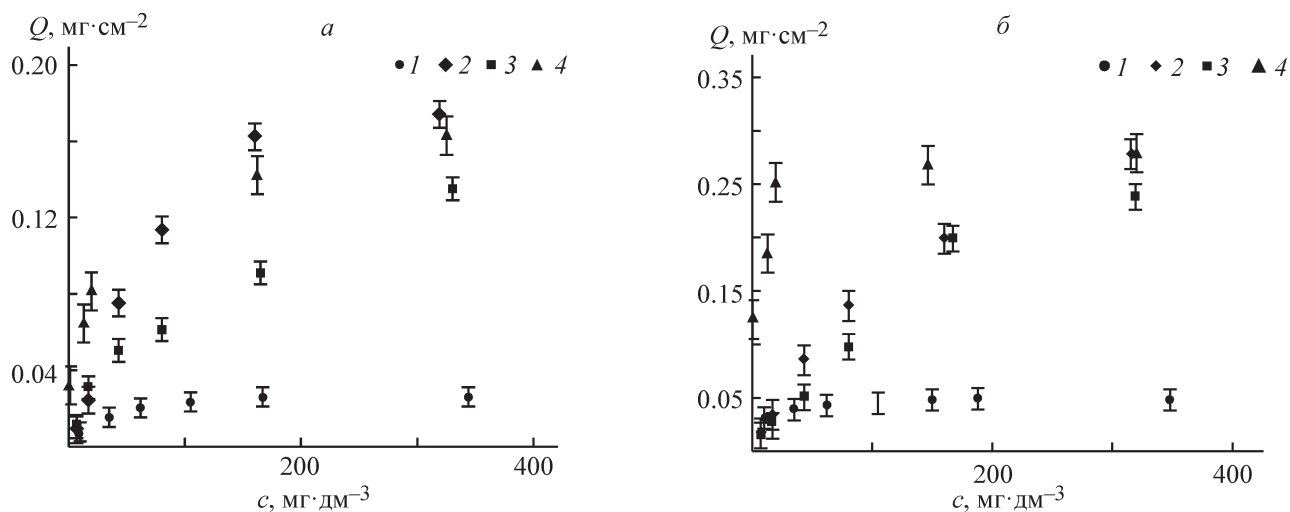


Рис. 1. Изотермы адсорбции меди(II) (1), гистидина (2), лизина (3), 3,6-диамино-10-метилакридин хлорида (4) мембранами ПА-5(-) (а) и ПА-10(-) (б).

Важным является длина углеводородного радикала аминокислоты и его строение, в частности, наличие кольчатой структуры у His приводит к возрастанию устойчивости системы ПА-10(His) по сравнению с ПА-10(Lys) при pH ниже pI соответствующей аминокислоты ($pI_{\text{Lys}} 9.8$). Ионная сила раствора — второй (после pH) по значимости фактор, величину которого необходимо контролировать при использовании аминокислот в качестве компонентов нековалентной иммобилизации на поверхности матриц: при значении ионной силы 10^{-1} моль·дм⁻³ степень десорбции возрастает до 20–35%, а при увеличении концентрации соли до 1 моль·дм⁻³ — превышает 50%.

При иммобилизации 3,6-диамино-10-метилакридин хлорида наибольшая десорбция наблюдается

в растворе с достаточно высокой ионной силой и в водно-органической среде. Совместное действие этих факторов приводит к возрастанию степени десорбции до 25–30%.

В случае ПА-10(Cu) в кислой среде конкуренция ионов водорода способствует увеличению десорбции иммобилизованного компонента до 1–1.5%.

Результаты динамических исследований (рис. 2) не противоречат данным, полученным в ходе статических экспериментов. При фильтрации раствора с нейтральным значением pH и не превышающей 10^{-3} моль·дм⁻³ ионной силой степень десорбции иммобилизованных компонентов составляет для ПА-10(Cu) ~0.1%, для ПА-10(Lys) — ~9%, для ПА-10(His) — ~2%, для ПА-10(Acr) — ~0.2%.

Таблица 1

Параметры изотерм адсорбции ионов меди(II), гистидина, лизина и 3,6-диамино-10-метилакридин хлорида мембранами ПА-5(-) и ПА-10(-)

Мембрана	Адсорбируемый компонент	Изотерма Ленгмюра			Изотерма Фрейндлиха		
		Q_m	b	R^2	K_{LF}	$1/n$	R^2
ПА-5(-)	Медь(II)	0.0281	0.0391	0.999	0.0041	0.3504	0.884
	Гистидин	0.2462	0.0089	0.940	0.0048	0.6704	0.895
	Лизин	0.1728	0.0088	0.941	0.0076	0.4894	0.994
	3,6-Диамино-10-метилакридин хлорид	0.1688	0.0555	0.995	0.0304	0.3005	0.992
ПА-10(-)	Медь(II)	0.0494	0.1375	0.998	0.0239	0.1321	0.925
	Гистидин	0.3448	0.0052	0.992	0.0041	0.7620	0.984
	Лизин	0.3221	0.0034	0.829	0.0028	0.7937	0.986
	3,6-Диамино-10-метилакридин хлорид	0.2710	0.2637	0.998	0.1441	0.1257	0.903

Таблица 2

Десорбция иммобилизованных на поверхности мембраны ПА-10(-) ионов меди(II), лизина, гистидина и 3,6-диамино-10-метилакридин хлорида в статическом режиме

Мембрана	Десорбционная среда			Степень десорбции иммобилизованного компонента, %
	pH	концентрация KCl, моль·дм ⁻³	этанол:вода = 60:40, об%	
ПА-10(Cu)	3.5	—	—	1.26 ± 0.14
	7.0	—	—	0.01 ± 0.005
	9.0	—	—	0.03 ± 0.01
	7.0	10 ⁻³	—	0.01 ± 0.003
	7.0	10 ⁻²	—	0.05 ± 0.01
	7.0	10 ⁻¹	—	0.10 ± 0.02
ПА-10(Lys)	3.5	—	—	2.42 ± 0.07
	7.0	—	—	4.42 ± 0.26
	9.0	—	—	10.12 ± 1.21
	7.0	10 ⁻³	—	5.36 ± 0.41
	7.0	10 ⁻²	—	8.74 ± 1.14
	7.0	10 ⁻¹	—	35.12 ± 1.17
ПА-10(His)	3.5	—	—	0.48 ± 0.12
	7.0	—	—	0.89 ± 0.09
	9.0	—	—	15.6 ± 1.47
	7.0	10 ⁻³	—	0.51 ± 0.07
	7.0	10 ⁻²	—	2.8 ± 0.54
	7.0	10 ⁻¹	—	19.36 ± 0.40
ПА-10(Acr)	3.5	—	—	2.51 ± 0.42
	7.0	—	—	0.37 ± 0.10
	9.0	—	—	0.42 ± 0.13
	7.0	10 ⁻³	—	0.44 ± 0.11
	7.0	10 ⁻²	—	0.68 ± 0.14
	7.0	10 ⁻¹	—	2.71 ± 0.15
	—	—	+	7.82 ± 0.25

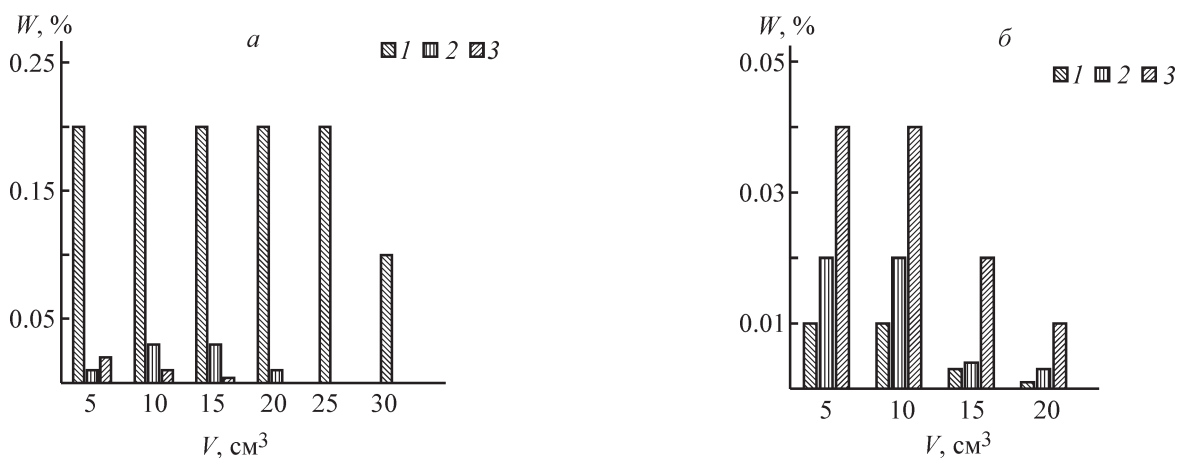


Рис. 2. Влияние pH (а, в, д, ж) и ионной силы раствора (б, з, е, з) на десорбцию в режиме ультрафильтрации ионов меди(II) [мембрана ПА-10(Cu)] (а, б), лизина [мембрана ПА-10(Lys)] (в, з), гистидина [мембрана ПА-10(His)] (д, е), 3,6-диамино-10-метилакридин хлорида [мембрана ПА-10(Acr)] (ж, з).

а, в, д, ж — pH: 3.5 (1), 7.0 (2), 9.0 (3); б, з, е, з — c_{KCl} (моль·дм⁻³): 10⁻³ (1), 10⁻² (2), 10⁻¹ (3).

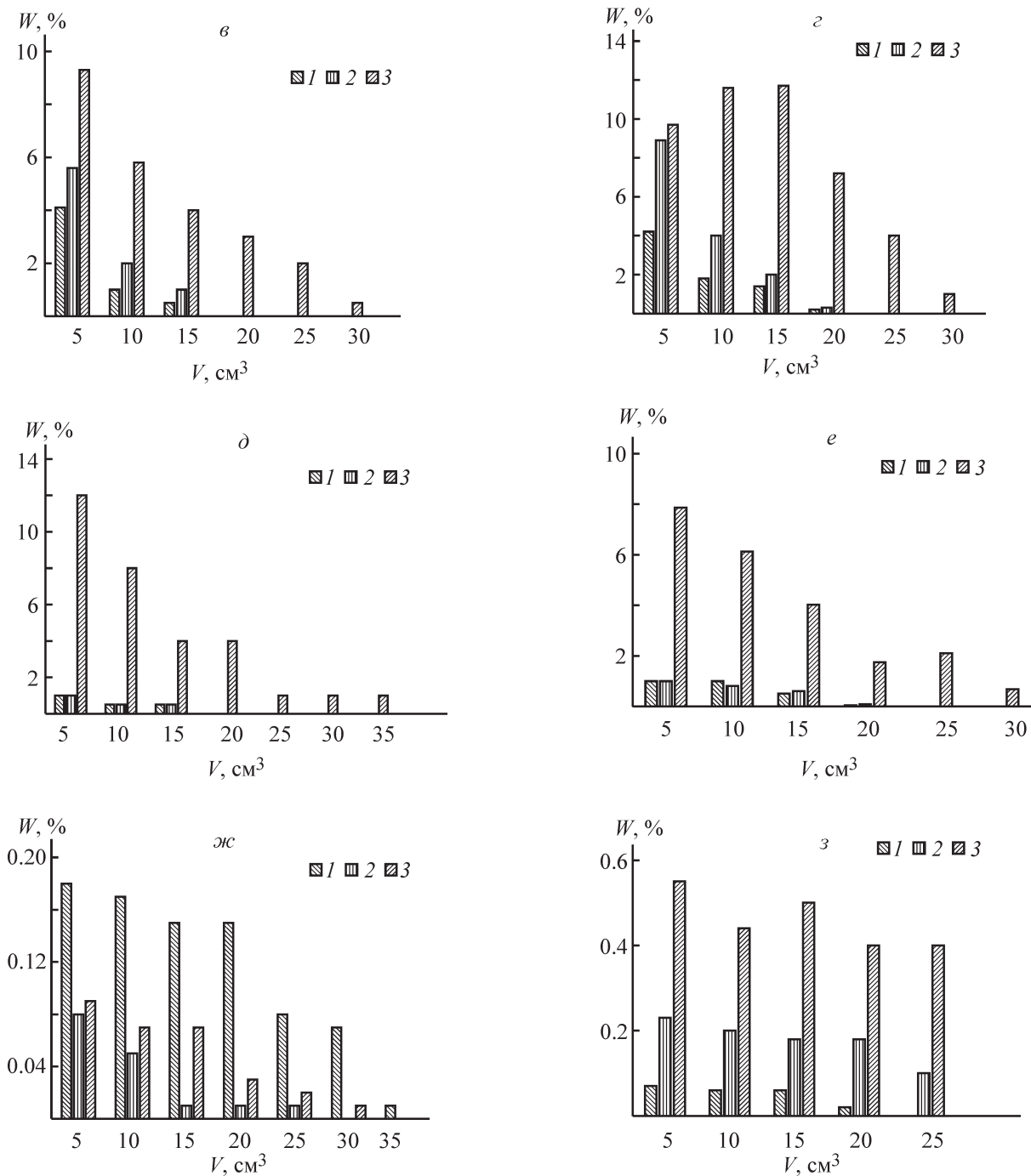


Рис. 2 (продолжение).

Изменение рН (снижение до 3.5 или рост до 9.0) и повышение ионной силы раствора (до 10^{-1} моль·дм $^{-3}$) приводит к возрастанию степени десорбции W иммобилизованных компонентов. Однако рост значений W в существенной степени зависит от их природы. Для ПА-10(Cu) наблюдается увеличение этого показателя до $\sim 1\%$, для ПА-10(Lys) — до $\sim 45\%$, для ПА-10(His) — до $\sim 30\%$, для ПА-10(Act) — до $\sim 2.5\%$.

Таким образом, при наиболее неблагоприятных условиях проведения ультрафильтрационного эксперимента остаточное количество меди(II), лизина, гистидина и 3,6-диамино-10-метилакридин хлорида на поверхности мембраны ПА-10(-) составляет 0.86, 0.70, 1.25 и 1.04 мкмоль·см $^{-2}$. Можно полагать, что различие полученных значений обусловлено вкладом в иммобилизацию неэлектростатических взаимодействий компонент/мембрана.

Выводы

Создание эффективной афинной фильтрационной системы предполагает решение двух основных задач: получение матрицы с регулируемыми фильтрационными свойствами и варьируемым количеством функциональных, используемых для иммобилизации компонентов групп и выбор способов иммобилизации и условий, обеспечивающих устойчивость систем иммобилизованный компонент/мембрана. Используемый в настоящей работе сополиамид с варьируемой концентрацией сульфонатных групп представляется перспективной основой для формирования матрицы. При этом применение сополимера обеспечивает равномерное распределение заряженных групп по разделительной поверхности мембран. Устойчивость фиксации активного компонента на поверхности носителя для выбранного способа иммобилизации определяется природой лиганда и свойствами десорбционной среды (рН, ионной силой, полярностью). В случае применения в качестве компонента иммобилизации аминокислот при рН выше их рI, когда поверхность мембраны и молекулы аминокислот заряжены одноименно, а также при увеличении концентрации соли в растворе до 10^{-1} моль·дм⁻³ степень десорбции достигает 35%. При иммобилизации 3,6-диамино-10-метил-акридин хлорида наибольшая десорбция наблюдается в растворе с достаточно высокой ионной силой и в водно-органической среде. Совместное действие этих факторов приводит к возрастанию степени десорбции до 20–30%. В случае ПА-10(Cu) основным фактором нестабильности системы является рН среды. Однако даже в кислой среде степень десорбции иммобилизованного компонента составляет 1–1.5%. В нейтральной среде с концентрацией соли, не превышающей 10^{-3} моль·дм⁻³, все изученные системы иммобилизованный компонент/мембрана демонстрируют хорошую устойчивость.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

Информация об авторах

Смирнова Наталья Николаевна, д.х.н., доцент, директор Института биологии и экологии Владимирского государственного университета, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7588-3555>

Список литературы

- [1] Membrane fabrication / Eds N. Hilal, A. Ismail, C. Wright. New York: CRC Press, 2015. P. 1–42. <https://doi.org/10.1201/b18149>
- [2] Comprehensive membrane science and engineering / Eds E. Drioli, L. Giorno. Amsterdam: Elsevier, 2010. V. 2. P. 65–84. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-093250-7.00037-2>
- [3] Ulbricht M. Advanced functional polymer membranes // Polymer. 2006. V. 47. P. 2217–2262. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2006.01.084>
- [4] Van Krevelen D., Nijenhuis K. Properties of polymers. Elsevier Sci., 2009. P. 189–227. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-054819-7.00007-8>
- [5] Moad G., Solomon D. The chemistry of radical polymerization. Elsevier Sci., 2005. P. 333–412. <https://doi.org/10.1007/978-0-080-91370-4>
- [6] Назаров В. Г. Поверхностная модификация полимеров. М.: Москов. гос. ун-т печати, 2008. С. 248–443.
- [7] Тимакова К. А., Тарасов А. В., Федотов Ю. А., Лепешин С. А., Панов Ю. Т. Исследование бактерицидных свойств модифицированных полиамидных мембран // Мембраны и мембран. технологии. 2012. Т. 2. № 2. С. 74–84.
- [8] Emin C., Kurnia E., Katalia I., Ulbricht M. Polyarylsulfone-based blend ultrafiltration membrane with combined size and charge selectivity for protein separation // Separ. Purif. Technol. 2018. V. 198. P. 127–138. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2017.11.008>
- [9] Wang J., Wu G., Shi W., Liu X., Ruan Ch., Xue M., Ge D. Affinity electromembrane with covalently coupled heparin for thrombin adsorption // J. Membr. Sci. 2013. V. 428. P. 70–77. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2012.11.015>
- [10] Bai L., Liang H., Crittenden J., Qu F., Ding A., Ma J., Du X., Guo Sh., Li G. Surface modification of UF membranes with functionalized MWCNTs to control membrane fouling by NOM fractions // J. Membr. Sci. 2015. V. 492. P. 400–411. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2015.06.006>
- [11] Lin Zh., Hu Ch., Wu X., Zhong W., Chen M., Zhang Q., Zhu A., Liu Q. Towards improved antifouling ability and separation performance of polyethersulfone ultrafiltration membranes through poly(ethylenimine) grafting // J. Membr. Sci. 2018. V. 554. P. 125–133. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2018.02.065>
- [12] Fan J., Luo J., Song W., Wan Y. One-step purification of α_1 -antitrypsin by regulating polyelectrolyte ligands on mussel-inspired membrane adsorber // J. Membr. Sci. 2017. V. 528. P. 155–162. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2017.01.037>
- [13] Zhao Ch., Xue J., Ran F., Sun Sh. Modification of polyethersulfone membranes — A review of methods // Progr. Mater. Sci. 2013. V. 58. P. 76–150. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2012.07.002>

- [14] Фатиянц Е. Х., Березкин В. В., Каграманов Г. Г. Методы модификации трековых мембран для разделения биологических объектов // Мембраны и мембран. технологии. 2013. Т. 3. № 1. С. 38–49.
- [15] Федотов Ю. А., Смирнова Н. Н., Емелин Е. А., Гитис С. С., Зотова Н. И., Субботин В. А., Гитис Л. С., Грудцын Ю. Д. Свойства ароматических сульфатсодержащих сополиамидов // Высокомолекуляр. соединения. 1997. Т. 39А. № 7. С. 1206–1211 [Fedotov Yu. A., Smirnova N. N., Emelin E. A., Gitis S. S., Zotova N. I., Subbotin V. A., Gitis L. S., Grudtsyn Yu. D. Properties of sulfonate-containing aromatic copolyamides // Polym. Sci. Ser. A. 1997. V. 39. N 7. P. 814–819].
- [16] Dabrowski A. Adsorption — from theory to practice // Adv. Colloid Interface Sci. 2001. V. 93. P. 135–224. [https://doi.org/10.1016/S0001-8686\(00\)00082-8](https://doi.org/10.1016/S0001-8686(00)00082-8)
- [17] Foo K. Y., Hameed B. H. Insights into the modeling of adsorption isotherm systems // Chem. Eng. J. 2010. V. 156. P. 2–10. <https://doi.org/10.1016/j.ccej.2009.09.013>
- [18] Quiroga E., Ramirez-Pastor A. J. Statistical thermodynamics of molecules with multiple adsorption states: Application to protein adsorption // Chem. Phys. Lett. 2013. V. 556. P. 330–335. <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2012.11.019>
- [19] Смирнова Н. Н., Красильников И. В. Влияние природы иммобилизованных компонентов на адсорбционные и массообменные свойства ультрафильтрационных мембран на основе сульфатсодержащего сополиамида // ЖПХ. 2019. Т. 92. № 11. С. 1476–1487. <https://doi.org/10.1134/S0044461819110148> [Smirnova N. N., Krasil'nikov I. V. An effect of the nature of immobilized components on the adsorption and mass transfer properties of ultrafiltration membranes based on sulfonate-containing copolyamide // Russ. J. Appl. Chem. 2019. V. 92. N 11. P. 1570–1580. <https://doi.org/10.1134/S1070427219110144>].
- [20] Polyelectrolytes with Defined Molecular Architecture II / Ed. by M. Schmidt. Berlin, Heidelberg: Springer, 2004. P. 115–133. <https://doi.org/10.1007/b10951>
- [21] Кабанов В. А. Полиэлектролитные комплексы в растворе и в конденсированной фазе // Успехи химии. 2005. Т. 74. № 1. С. 5–24 [Kabanov V. A. Polyelectrolyte complexes in solution and in bulk // Russ. Chem. Rev. 2005. V. 74. N 1. P. 3–20. <https://doi.org/10.1070/RC2005v074n01ABEH001165>].
- [22] Polyelectrolyte complexes in the dispersed and solid state. I. Principles and theory / Ed. by M. Müller. Berlin, Heidelberg: Springer, 2014. P. 181–226. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-40734-5>
-