

**КОНЦЕНТРАЦИЯ ИОННЫХ ГРУПП КАК ФАКТОР РЕГУЛИРОВАНИЯ  
АДСОРБЦИОННЫХ И МАССООБМЕННЫХ СВОЙСТВ  
УЛЬТРАФИЛЬТРАЦИОННЫХ МЕМБРАН НА ОСНОВЕ АРОМАТИЧЕСКОГО  
ПОЛИ- И СОПОЛИАМИДА**

© Н. Н. Смирнова<sup>1</sup>, А. Д. Каталевский<sup>1</sup>, К. В. Смирнов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Владимирский государственный университет им. Александра Григорьевича  
и Николая Григорьевича Столетовых,  
600000, г. Владимир, ул. Горького, д. 87

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный университет,  
199034, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 7/9  
E-mail: smirnovann@list.ru

Поступила в Редакцию 12 декабря 2022 г.

После доработки 6 февраля 2023 г.

Принята к публикации 18 февраля 2023 г.

*Получены ультрафильтрационные мембраны на основе поли-м-фениленизофталамида и статистического сополиамида, содержащего 1, 3, 5 и 10 мол% звеньев с сульфонатными группами. Изучены адсорбционные (в статических условиях и в условиях ультрафильтрации растворов белков) и массообменные свойства мембран. Для проведения адсорбционных и разделительных экспериментов использованы растворы бацитрацина, лизоцима, миоглобина и бычьего сывороточного альбумина. Показано, что при наличии заряда у белковых макромолекул и поверхности мембраны роль электростатических сил является определяющей в механизме адсорбции белка, однако вклад неэлектростатических взаимодействий мембрана/белок значителен. Установлено, что в изученных системах адсорбционная емкость мембран может варьироваться от 0.02 до 0.29 мг·см<sup>-2</sup>. Получены кинетические зависимости удельной производительности и селективности мембран. Показано, что инструменты регулирования интенсивности электростатического взаимодействия (концентрация и природа ионных групп в сополимере и pH раствора белка) являются инструментами управления транспортными характеристиками мембран. Оптимальное сочетание массообменных свойств полученных мембран может быть достигнуто при pH выше изоэлектрической точки белка.*

Ключевые слова: ароматические поли- и сополиамиды; мембраны; ультрафильтрация; адсорбционные и массообменные свойства

DOI: 10.31857/S0044461822100085; EDN: ADRWKM

Разработка новых высокоэффективных синтетических мембран привела к появлению в литературе термина «функциональные мембраны», т. е. содержащие группы и (или) фрагменты, обладающие специ-

фической активностью по отношению к компонентам фильтруемых растворов [1]. К основным направлениям получения таких мембран можно отнести: синтез новых поли- и сополимеров, строение и состав

которых способны обеспечить хорошие «барьерные» свойства и наличие/отсутствие взаимодействий разделяемых смесей с поверхностью мембраны; изготовление композитных и гибридных мембран, сочетающих свойства различных материалов; активное внедрение новых видов обработки поверхности мембранных образцов, в частности технологии получения тонкослойных покрытий и миниатюризация производства мембран.

Введение в состав полимерных мембран ионных групп является одним из наиболее изученных (как в теоретическом, так и в технологическом плане) и наиболее перспективных (в части получаемых результатов) направлений их «функционализации». Известны три основных способа практического решения этой задачи: синтез сополимеров, включающих звенья, содержащие ионные группы, поверхностная модификация мембранного материала, введение в полимерную композицию полиэлектролитов. Следствием наличия в мембранах ионных групп является изменение их электроповерхностных свойств, что в значительной степени определяет механизм разделения и транспортные характеристики образцов при фильтрации растворов, включающих частицы, несущие заряд, в частности белковых растворов [2–4]. Кроме того,

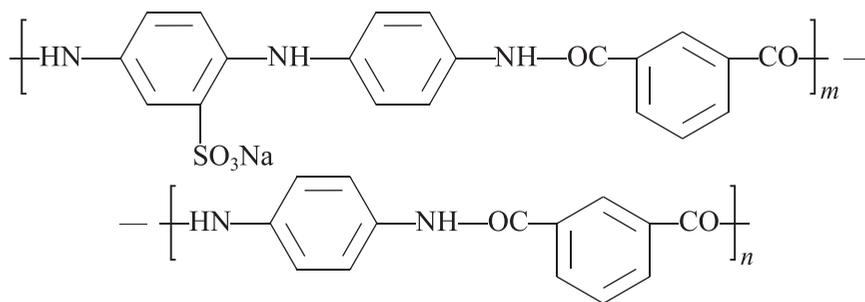
согласно литературным данным [5, 6], присутствие в составе матрицы мембраны фиксированного заряда оказывает влияние на пористость активного слоя материала (за счет электростатического отталкивания зарядов на поверхности пор), увеличивая производительность мембраны при сохранении высокой селективности благодаря кулоновским взаимодействиям поверхности мембраны и компонентов фильтруемого раствора.

Сочетание механических, термических и химических свойств полиамидов и высоких массообменных характеристик мембран на их основе определило активное применение полимеров этого класса в мембранной технологии [7–9].

Цель работы — оценка степени влияния наличия и концентрации сульфонатных групп в макромолекуле полиамида на массообменные характеристики полученных мембран в процессе ультрафильтрации белковых растворов.

### Экспериментальная часть

Поли-*m*-фениленизофталамид и сульфонатсодержащий сополиамид синтезированы в ОАО «Полимерсинтез» [10]:



- $m = 1, n = 99$  мол% (I);  
 $m = 3, n = 97$  мол% (II);  
 $m = 5, n = 95$  мол% (III);  
 $m = 10, n = 90$  мол% (IV).

Для получения мембран использовали поли-*m*-фениленизофталамид и сульфонатсодержащий сополиамид 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 лавсанового материала (ООО «Номатекс»). Номинально отсекаемая молекулярная масса изученных образцов, определенная по методике [11], 25–30 кДа. Результаты исследования их элек-

троповерхностных свойств (согласно методике [12]) представлены в табл. 1.

Для проведения адсорбционных и разделительных экспериментов использовали бычий сывороточный альбумин (BSA) (10735078001, Sigma), лизоцим куриных яиц (Lys) (4403-M, Sigma), миоглобин (Myo) (M1882, Sigma) и бацитрацин (Baci) (PHR1590, Sigma).

Для изучения адсорбции белков в статическом режиме использовали образцы мембран площадью

**Таблица 1**  
Электроповерхностные свойства полиамидных мембран

Мембрана	Поли- <i>m</i> -фенилен-изофталамид	Сополиамид с 1 мол% звеньев с сульфонатными группами	Сополиамид с 3 мол% звеньев с сульфонатными группами	Сополиамид с 5 мол% звеньев с сульфонатными группами	Сополиамид с 10 мол% звеньев с сульфонатными группами
ζ-Потенциал, мВ	+2.4	-5.3	-14.7	-25.5	-43.8

1–2 см<sup>2</sup>. Объем раствора белка составлял 2.5 см<sup>3</sup>. Для приготовления растворов применяли универсальный буфер на основе смеси ортофосфорной (ч.д.а., АО «Химреактив»), уксусной (ч.д.а., АО «Химреактив») и борной (ч.д.а., ООО «АО Реахим») кислот с концентрацией 0.04 М по каждому из компонентов и гидроксида натрия (ч.д.а., ООО «АО Реахим») с концентрацией 0.2 М. Адсорбционные свойства мембран оценивали по изменению содержания белка в растворах после выдерживания в них образцов до установления равновесия. Концентрацию белка определяли с помощью спектрофотометра СФ-2000 (ОКБ «Спектр») по оптической плотности при длине волны  $\lambda = 278$  нм. Адсорбционную емкость  $Q$  рассчитывали как отношение массы адсорбированного белка к площади образца. Количество параллельных опытов в сериях экспериментов составляло не меньше пяти. Результаты, описывающие экспериментальные данные, обрабатывали по теории ошибок. Доверительный интервал рассчитывали для уровня значимости 0.05.

Для динамических исследований использовали тупиковую разделительную ячейку. Исследования проводили при давлении 0.1 МПа, концентрация белка в буферном растворе при соответствующем значении рН составила 0.2 г·дм<sup>-3</sup>. Давление в системе поддерживали с помощью сжатого азота (ос.ч., ООО «ИТЦ Промэксервис»). Контроль рН осуществляли с помощью рН-метра «ЭКСПЕРТ-001» (ООО «ЭКОНИКС-ЭКСПЕРТ»). Объем фильтруемого раствора составлял 40 см<sup>3</sup>. Для измерения оптической плотности и расчета материального баланса в процессе фильтрации отбирали пробы как фильтрата, так и концентрата. Для оценки адсорбционной активности мембран при ультрафильтрации использовали величину адсорбции  $Q_{UF}$ .

Селективность мембран определяли по формуле

$$R = (c_0 - c_f)/c_0, \quad (1)$$

где  $c_f$  и  $c_0$  — концентрация белка в фильтрате и исходном растворе соответственно (г·дм<sup>-3</sup>).

Для расчета удельной производительности мембран использовали формулу

$$I = V/(tS), \quad (2)$$

где  $V$  — объем фильтрата (см<sup>3</sup>),  $t$  — время эксперимента (мин),  $S$  — площадь мембраны (см<sup>2</sup>).

Для изучения изменения морфологии поверхности образцов мембран в процессе ультрафильтрации растворов белка использовали метод атомной силовой микроскопии (Ntegra Aura, NT-MDT).

### Обсуждение результатов

Проведенные ранее исследования показали целесообразность использования для их описания моделей Ленгмюра и Ленгмюра–Фрейндлиха [13]. В целом полученные данные вполне согласуются с существующим мнением относительно доминирования кулоновских сил в адсорбционных процессах при наличии на поверхности адсорбента ионных групп [14–16]. Использование в мембранообразующей композиции сополимеров, содержащих сульфонатные группы, приводит к реализации мембранами максимальной адсорбции при рН ниже  $pI$  белков, т. е. в том случае, когда их макромолекулы положительно заряжены. Наблюдается зависимость между составом сульфонатсодержащего сополиамида и адсорбционной емкостью мембраны на его основе в условиях максимальной адсорбции (рис. 1).

При рН, равном  $pI$  белков, адсорбция в основном осуществляется за счет неэлектростатических взаимодействий мембрана/белок. В целом адсорбционная емкость мембран на основе сульфонатсодержащего сополиамида в этой области ниже, чем при  $pH < pI_{\text{белка}}$ . Однако полученные в ходе экспериментов значения  $Q$  достаточно высоки. В условиях отсутствия заряда белковой макромолекулы решающим становится не факт наличия и содержания ионных групп в полимере, а природа полимера, определяющая интенсивность неэлектростатических взаимодействий. Речь идет прежде всего о водородных связях

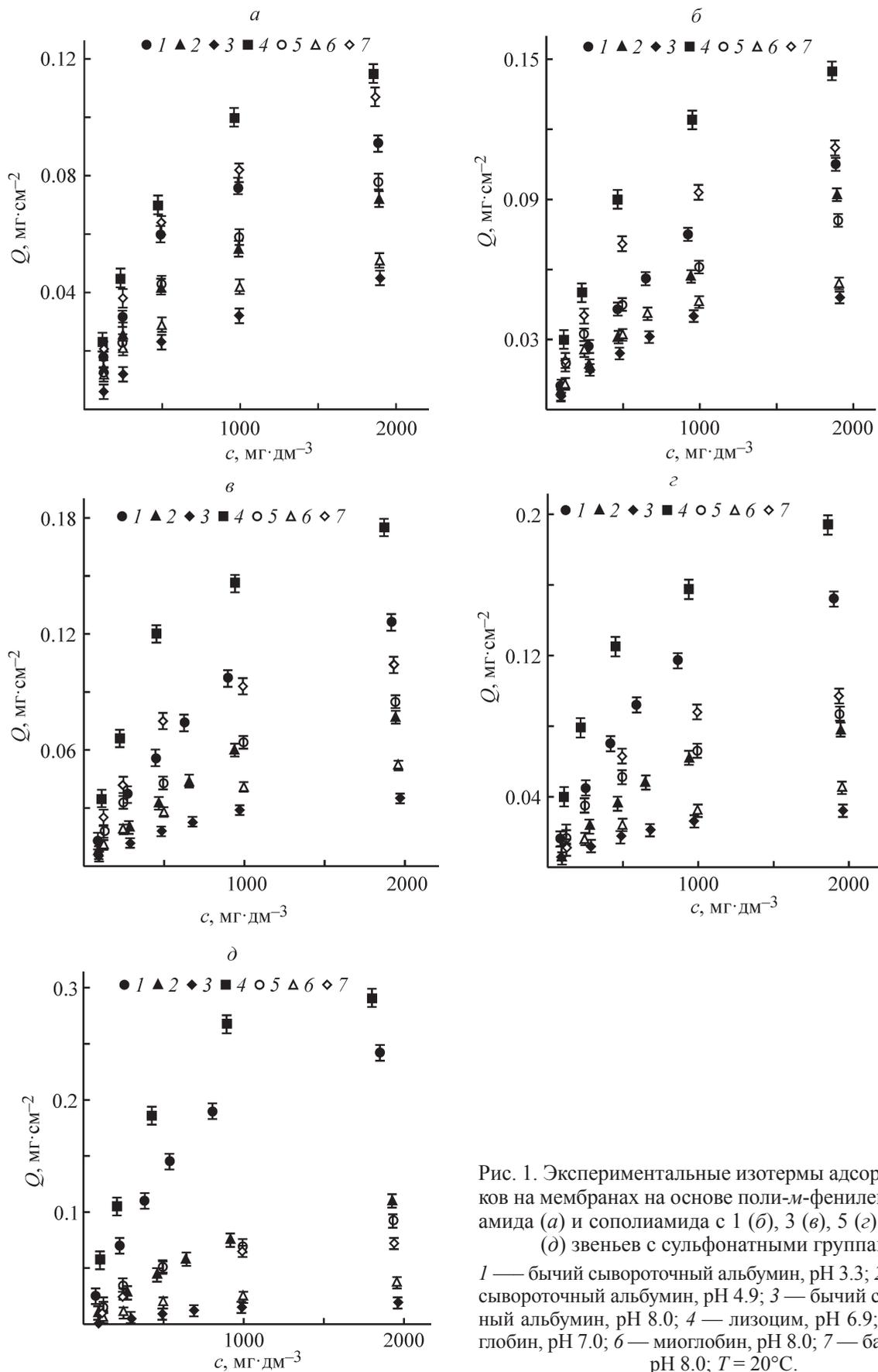


Рис. 1. Экспериментальные изотермы адсорбции белков на мембранах на основе поли-*m*-фениленизофталамида (*a*) и сополиамида с 1 (*б*), 3 (*в*), 5 (*г*), 10 мол% (*д*) звеньев с сульфонатными группами.

1 — бычий сывороточный альбумин, рН 3.3; 2 — бычий сывороточный альбумин, рН 4.9; 3 — бычий сывороточный альбумин, рН 8.0; 4 — лизоцим, рН 6.9; 5 — миоглобин, рН 7.0; 6 — миоглобин, рН 8.0; 7 — бацитрацин, рН 8.0;  $T = 20^{\circ}\text{C}$ .

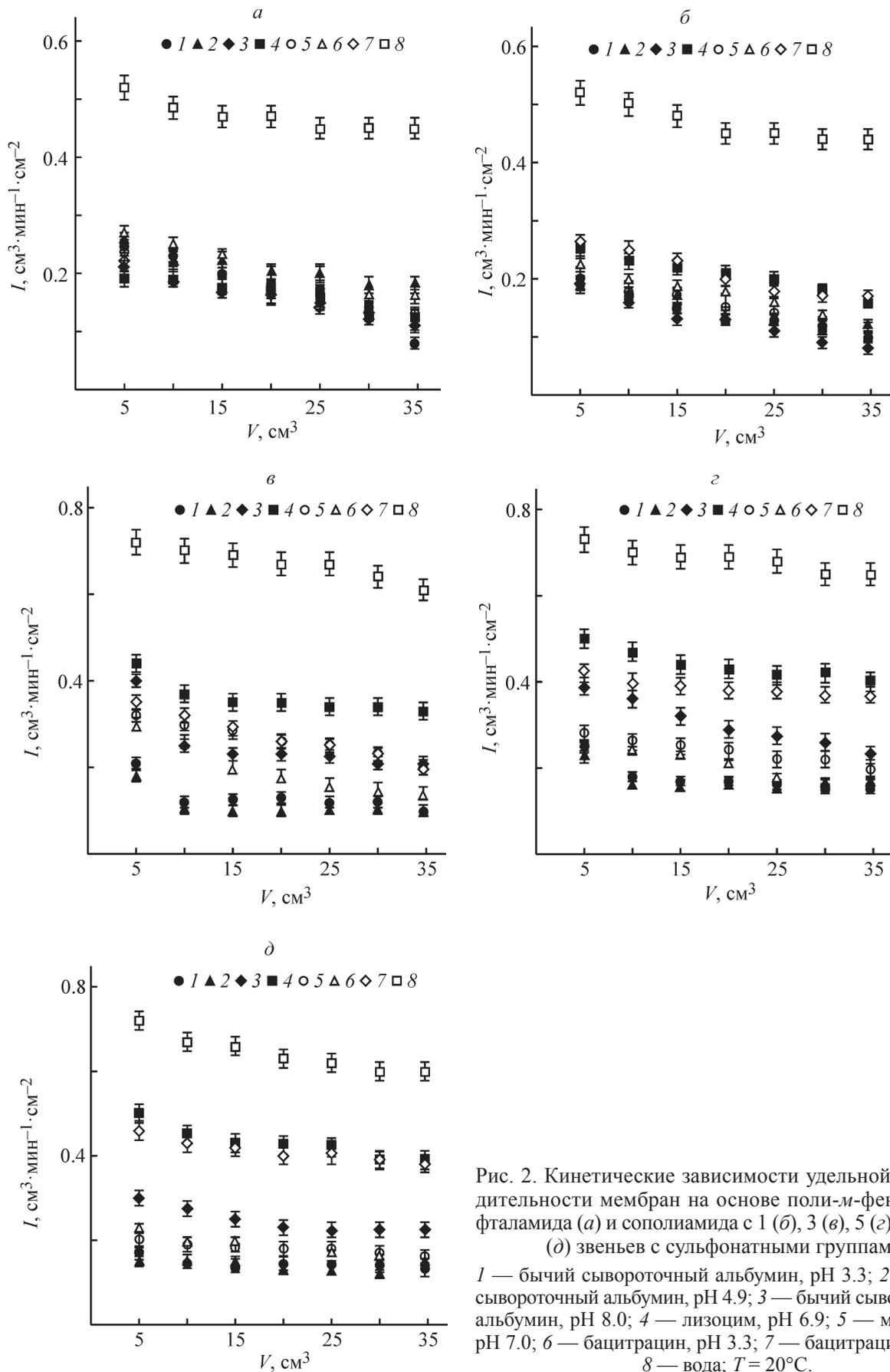


Рис. 2. Кинетические зависимости удельной производительности мембран на основе поли-*m*-фениленизофталамида (*a*) и сополиамида с 1 (*б*), 3 (*в*), 5 (*г*), 10 мол% (*д*) звеньев с сульфонатными группами. 1 — бычий сывороточный альбумин, рН 3.3; 2 — бычий сывороточный альбумин, рН 4.9; 3 — бычий сывороточный альбумин, рН 8.0; 4 — лизоцим, рН 6.9; 5 — миоглобин, рН 7.0; 6 — бацитрацин, рН 3.3; 7 — бацитрацин, рН 8.0; 8 — вода;  $T = 20^\circ\text{C}$ .

Таблица 2

Адсорбционные характеристики мембран в статических условиях и условиях ультрафильтрационного эксперимента

Мембрана	Белок, pH буферного раствора	Максимальная адсорбция в условиях статического эксперимента $Q$ , мг·см <sup>-2</sup>	Максимальная адсорбция в условиях ультрафильтрации $Q_{UF}$ , мг·см <sup>-2</sup>
Поли- <i>m</i> -фениленизофталамид	BSA, pH 3.3	0.091	0.052
	BSA, pH 4.9	0.072	0.058
	BSA, pH 8.0	0.045	0.033
	Lys, pH 6.9	0.115	0.040
	Myo, pH 7.0	0.078	0.062
	Myo, pH 8.0	0.051	0.042
	Vaci, pH 8.0	0.107	0.054
	Vaci, pH 3.3	0.079	0.052
Сополиамид с 1 мол% звеньев с сульфонатными группами	BSA, pH 3.3	0.105	0.502
	BSA, pH 4.9	0.082	0.061
	BSA, pH 8.0	0.052	0.040
	Lys, pH 6.9	0.145	0.043
	Myo, pH 7.0	0.081	0.063
	Myo, pH 8.0	0.054	0.044
	Vaci, pH 8.0	0.112	0.056
	Vaci, pH 3.3	0.114	0.059
Сополиамид с 3 мол% звеньев с сульфонатными группами	BSA, pH 3.3	0.126	0.066
	BSA, pH 4.9	0.081	0.053
	BSA, pH 8.0	0.035	0.018
	Lys, pH 6.9	0.175	0.054
	Myo, pH 7.0	0.085	0.070
	Myo, pH 8.0	0.052	0.040
	Vaci, pH 8.0	0.104	0.064
	Vaci, pH 3.3	0.112	0.070
Сополиамид с 5 мол% звеньев с сульфонатными группами	BSA, pH 3.3	0.152	0.077
	BSA, pH 4.9	0.085	0.024
	BSA, pH 8.0	0.032	0.018
	Lys, pH 6.9	0.204	0.063
	Myo, pH 7.0	0.087	0.048
	Myo, pH 8.0	0.045	0.036
	Vaci, pH 8.0	0.097	0.054
	Vaci, pH 3.3	0.120	0.080
Сополиамид с 10 мол% звеньев с сульфонатными группами	BSA, pH 3.3	0.242	0.087
	BSA, pH 4.9	0.098	0.039
	BSA, pH 8.0	0.019	0.011
	Lys, pH 6.9	0.291	0.101
	Myo, pH 7.0	0.092	0.052
	Myo, pH 8.0	0.037	0.020
	Vaci, pH 8.0	0.072	0.053
	Vaci, pH 3.3	0.140	0.131

Примечание. BSA — бычий сывороточный альбумин, Lys — лизоцим куриных яиц, Myo — миоглобин, Vaci — бацитрацин.

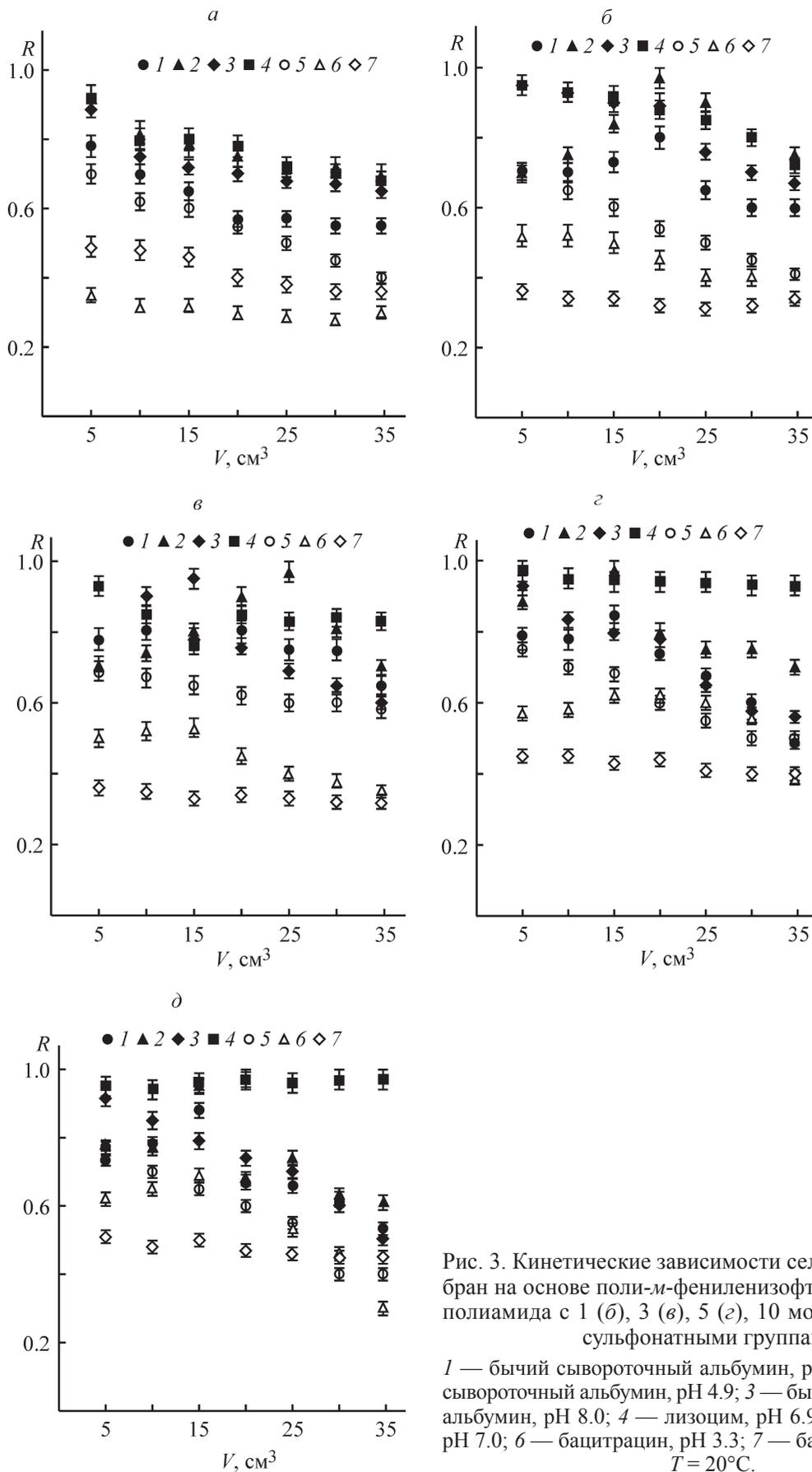


Рис. 3. Кинетические зависимости селективности мембран на основе поли-*m*-фениленизофталамида (а) и сополиамида с 1 (б), 3 (в), 5 (г), 10 мол% (д) звеньев с сульфонатными группами.

1 — бычий сывороточный альбумин, рН 3.3; 2 — бычий сывороточный альбумин, рН 4.9; 3 — бычий сывороточный альбумин, рН 8.0; 4 — лизоцим, рН 6.9; 5 — миоглобин, рН 7.0; 6 — бацитрацин, рН 3.3; 7 — бацитрацин, рН 8.0;  $T = 20^{\circ}\text{C}$ .

и гидрофобных взаимодействиях, достаточно интенсивных в системах, включающих ароматические полиамиды [17]. При pH выше  $pI$  белки заряжены отрицательно. В этих условиях доминирование сил отталкивания между содержащей сульфатные группы поверхностью мембраны и одноименно заряженными белковыми макромолекулами приводит к существенному снижению адсорбционной емкости образцов.

Адсорбция мембран на основе сополиамида, включающего 1% звеньев с сульфатными группами, изменяется с  $0.11\text{--}0.14\text{ мг}\cdot\text{см}^{-2}$  при  $\text{pH} < pI_{\text{белка}}$  до  $0.05\text{--}0.08\text{ мг}\cdot\text{см}^{-2}$  в случае  $\text{pH} > pI_{\text{белка}}$ . Увеличение в составе сополиамида концентрации звеньев с сульфатными группами до 10% приводит к сдвигу диапазонов значений  $Q$  до  $0.24\text{--}0.29$  и  $0.02\text{--}0.07\text{ мг}\cdot\text{см}^{-2}$  соответственно, т. е. различие адсорбционной емкости мембраны в зависимости от соотношения знаков зарядов ее поверхности и макромолекул белка может составлять от 2 [сополиамид (I)] до 6 раз [сополиамид (IV)]. Адсорбционная активность мембран при  $\text{pH} = pI_{\text{белка}}$  практически не зависит от концентрации сульфатных групп в сополиамиде и составляет  $0.07\text{--}0.09\text{ мг}\cdot\text{см}^{-2}$  (рис. 1). Характер изменения значений  $Q$  для мембраны на основе поли-*m*-фениленизофталамида, вероятно, определяется наличием и

соотношением в макромолекулах полиамида концевых amino- и карбоксильных групп.

Полученные в ходе адсорбционных экспериментов в статических условиях данные позволяют ожидать существенного вклада адсорбционной составляющей в разделительные и транспортные свойства синтезированных полиамидных мембран (рис. 2, 3).

Как и ожидалось, кулоновские силы мембрана/белок в значительной степени определяют механизм загрязнения синтезированных мембран. Наблюдается корреляция между содержанием сульфатных групп в сополиамиде, адсорбционной активностью в ходе фильтрационного эксперимента полученных на его основе мембран (табл. 2), скоростью и степенью снижения их удельной производительности (рис. 3).

Адсорбционная емкость мембран на основе сополиамида, содержащего 1% звеньев с сульфатными группами, изменяется при ультрафильтрации с  $0.04\text{--}0.06\text{ мг}\cdot\text{см}^{-2}$  при  $\text{pH} < pI_{\text{белка}}$  до  $0.04\text{--}0.05\text{ мг}\cdot\text{см}^{-2}$  в случае  $\text{pH} > pI_{\text{белка}}$ . Увеличение в составе сополиамида концентрации звеньев с сульфатными группами до 10% приводит к сдвигу диапазонов значений  $Q_{UF}$  до  $0.09\text{--}0.101$  и  $0.01\text{--}0.05\text{ мг}\cdot\text{см}^{-2}$  соответственно. Можно говорить о совпадении характера «адсорбционного профиля» мембран, полу-

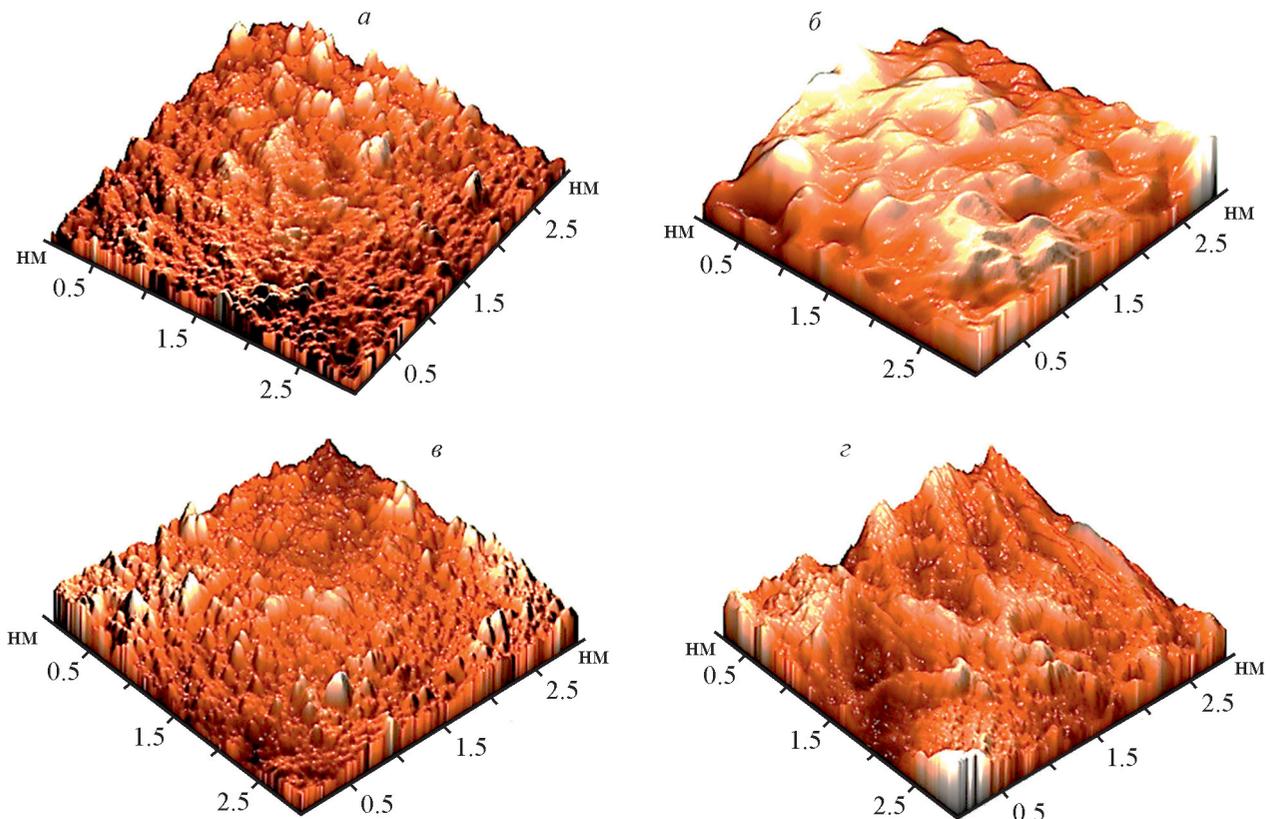


Рис. 4. Топография поверхности мембраны на основе сополиамида с 5 мол% звеньев с сульфатными группами до (а) и после фильтрации раствора бычьего сывороточного альбумина при pH 3.3 (б), 4.9 (в), 8.0 (г).

ченного как в ходе статического эксперимента, так и при ультрафильтрационном исследовании (табл. 2). Можно полагать, что именно различие адсорбционной активности полученных образцов (рис. 4) является основной причиной снижения их удельной производительности. Однако необходимо учитывать вклад в транспортные свойства мембран и сил отталкивания, реализуемых между их поверхностью и макромолекулами белка при  $pH > pI_{\text{белка}}$ . Увеличение содержания в полиамиде звеньев с сульфонатными группами с 1 до 10% приводит к росту удельной производительности мембран в этой области практически в 2 раза.

Природа взаимодействия мембрана/белок определяет характер кинетических зависимостей селективности образцов. При  $pH < pI_{\text{белка}}$  на первом этапе фильтрационного эксперимента наблюдается рост селективности, определяющийся, по-видимому, адсорбцией макромолекул белков на поверхности мембран (именно на этом этапе наблюдается наиболее существенное снижение удельной производительности образцов). Далее фиксируется уменьшение  $R$ . Максимальная селективность, которую обеспечивают в том числе адсорбционные взаимодействия, составляет для сополиамида (I) 0.52 (BacI), 0.80 (Lys), 0.95 (BSA), а для сополиамида (IV) 0.69 (BacI), 0.88 (Lys), 0.99 (BSA). При  $pH = pI_{\text{белка}}$  селективность мембран в ходе эксперимента монотонно снижается. Максимальное значение  $R$  равно для сополиамида (I) 0.70 (Myo), 0.95 (BSA), а для сополиамида (IV) 0.77 (Myo), 0.92 (BSA). При  $pH > pI_{\text{белка}}$  на кинетической зависимости можно выделить временной отрезок, в границах которого селективность мембран изменяется незначительно (этот интервал расширяется с ростом величины  $\zeta$ -потенциала поверхности образца), затем  $R$  снижается. Максимальное значение селективности при  $pH > pI_{\text{белка}}$  составляет для сополиамида (I) 0.36 (BacI), 0.95 (BSA), а для сополиамида (IV) 0.51 (BacI), 0.99 (BSA).

### Выводы

Проведенный сравнительный анализ адсорбционных и массообменных свойств серии полученных ультрафильтрационных мембран на основе ароматического поли- и сополиамида с различной концентрацией звеньев с сульфонатными группами позволил оценить вклад природы взаимодействий мембрана/белок в реализуемые в процессе фильтрации разделительный и транспортный механизмы. Показано, что взаимодействия мембрана/белок определяют скорость и интенсивность засорения мембран. Наличие в

макромолекулярной цепи полиамидов ароматических фрагментов и амидных групп обуславливает существенный вклад в эти взаимодействия гидрофобных сил и водородных связей, но введение в полимерную макромолекулу ионных групп приводит к доминированию электростатических сил. Именно поэтому инструменты регулирования интенсивности кулоновских сил (концентрация ионных групп в сополимере и  $pH$  раствора белка) являются инструментами управления адсорбционными свойствами синтезированных мембран и, как следствие, их транспортными характеристиками. Можно полагать, что существует «оптимальный» заряд поверхности и, следовательно, «оптимальный» состав сополимера, обеспечивающий необходимое сочетание разделительных и транспортных характеристик мембраны в зависимости от решаемой практической задачи.

### Благодарности

Авторы выражают благодарность к.т.н., доценту кафедры химии Владимирского государственного университета И. А. Красильниковой за помощь в проведении эксперимента.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

### Информация об авторах

*Смирнова Наталья Николаевна* д.х.н., профессор кафедры химии Владимирского государственного университета

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7588-3555>

*Каталевский Артем Дмитриевич*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7926-1745>

*Смирнов Кирилл Вадимович*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2875-3798>

### Список литературы

- [1] *Mathias U.* Advanced functional polymer membranes // *Polymer*. 2006. V. 47. N 7. P. 2217–2262. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2006.01.084>
- [2] *Rohani M., Zydney A.* Effect of surface charge distribution on protein transport through semipermeable ultrafiltration membranes // *J. Membr. Sci.* 2009. V. 337. P. 324–331. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2009.04.007>

- [3] Molek J., Ruanjaikaen K., Zydney A. Effect of electrostatic interactions on transmission of PEGylated proteins through charged ultrafiltration membranes // *J. Membr. Sci.* 2010. V. 353. P. 60–69. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2010.02.031>
- [4] 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>
- [5] Kalaivizhi R. Preparation of polymer blend membranes based on cellulose acetate and quaternized polyethersulfone for ultrafiltration // *Int. J. Green Pharm.* 2018. V. 12 (2). P. 123–128. <https://doi.org/10.22377/ijgp.v12i02.1765>
- [6] Khoerunnisa F., Sihombin M., Nurhayati M., Dara F., Triadi H., Nasir M., Hendrawan H., Pratiwi A., Ng E., Opaprakasit P. Poly(ether sulfone)-based ultrafiltration membranes using chitosan/ammonium chloride to enhance permeability and antifouling properties // *Polym. J.* 2022. V. 54. P. 525–537. <https://doi.org/10.1038/s41428-021-00607-7>
- [7] Akther N., Phuntsho Sh., Chen Y., Ghaffour N., Shon H. Recent advances in nanomaterial-modified polyamide thin-film composite membranes for forward osmosis processes // *J. Membr. Sci.* 2019. V. 584. P. 20–45. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2019.04.064>
- [8] Kolangare I., Isloor A., Asiri F., Ismail A. Improved desalination by polyamide membranes containing hydrophilic glutamine and glycine // *Env. Chem. Lett.* 2019. V. 17. P. 1053–1059. <https://doi.org/10.1007/s10311-018-00825-1>
- [9] Zhang H., Wu M., Zhou K., Law A. Molecular insights into the composition–structure–property relationships of polyamide thin films for RO desalination // *Ind. Eng. Chem. Res.* 2019. V. 53 (11). P. 6374–6382. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b02214>
- [10] 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 сульфонатсодержащих сополиамидов // *Высокомолекуляр. соединения. Сер. А.* 1997. Т. 39. № 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].
- [11] Черкасов А. Н. Экспресс-анализ структуры ультрафильтрационных мембран в ходе их разработки // *Мембраны.* 2002. № 14. С. 3–17.
- [12] Березкин В. В., Киселева О. А., Нечаев А. Н., Соболев В. Д., Чураев Н. В. Электропроводность растворов КСl в порах ядерных фильтров и их электроповерхностные свойства // *Коллоид. журн.* 1994. 56. № 3. С. 319–325.
- [13] Смирнова Н. Н., Небукина И. А. Влияние природы взаимодействия мембрана/белок на адсорбционные свойства ультрафильтрационных мембран на основе ароматических поли- и сополиамидов // *Сорбцион. и хроматогр. процессы.* 2018. Т. 18. № 3. С. 352–364. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2018.18/539>
- [14] Min J., Wang L. Heat of adsorption and its effects on transmembrane heat transfer // *J. Membr. Sci.* 2012. V. 409–410. P. 173–179. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2012.03.053>
- [15] Molek J., Ruanjaikaen K., Zydney A. Effect of electrostatic interactions on transmission of PEGylated proteins through charged ultrafiltration membranes // *J. Membr. Sci.* 2010. V. 353 (1–2). P. 60–69. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2010.02.031>
- [16] Hartvig R. A., Van de Weert M., Ostergaard J., Jorgensen L., Jensen H. Protein adsorption at charged surfaces: The Role of electrostatic interactions and interfacial charge regulation // *J. Langmuir.* 2011. V. 27 (6). P. 2634–2643. <https://doi.org/10.1021/la104720n>
- [17] Михайлин Ю. А. Термоустойчивые полимеры и полимерные материалы. СПб: Профессия, 2006. С. 348–365.