

УДК 678.6+54-126

## ПОЛИАМИДЫ В МЕМБРАННОЙ ТЕХНОЛОГИИ

© 2025 г. А. Д. Каталевский<sup>1</sup>, В. А. Маяцкий<sup>2</sup>, Н. Н. Смирнова<sup>1, \*</sup>

<sup>1</sup>Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых,  
ул. Горького, 87, Владимир, 600000, Россия

<sup>2</sup>ООО “Унипласт”, ул. Б.Нижегородская, 77, Владимир, 600016, Россия

\*e-mail: smirnovann@list.ru

Поступила в редакцию 16.12.2024

После доработки 05.02.2025

Принята к публикации 02.04.2025

Рассмотрены вопросы синтеза, структуры и применения ароматических полиамидов. Уникальные термические, физико-механические и химические свойства этих полимеров открыли возможности их использования в качестве функциональных и ультрасовременных материалов. Разнообразие инструментов, применяемых при создании и модификации ароматических полиамидов, позволяет “настроить” их свойства под решение конкретных задач, что делает ароматические полиамиды поистине универсальными для различных отраслей промышленности, включая мембранные технологии.

**Ключевые слова:** ароматические полиамиды, синтез, структура, применение, мембранные

DOI: 10.31857/S2218117225010011, EDN: LBDPAI

Полиамиды – обширный класс высокомолекулярных соединений, включающий как природные, так и синтетические вещества, в структурных звеньях которых содержится повторяющаяся амидная группа (–CO–NH–). Классификация синтетических полиамидов основана на их строении (алифатические, ароматические) и методах получения (поликонденсационные, полимеризационные). Преимуществами полиамидов, определяющими теоретический и практический интерес к полимерам этого класса, являются высокие термические (температуры размягчения и термической деструкции) и механические (деформационные и прочностные) характеристики синтезированных на их основе материалов.

Упоминания об ароматических полиамидах (арамидах) (АПА) появились в литературе в середине прошлого века, когда компания DuPont (США) опубликовала результаты исследования синтеза полимеров методом поликонденсации ароматических диаминов и хлорангидридов дикарбоновых кислот в амидном растворителе [1]. В начале шестидесятых годов в России во ВНИИСС (АО “Полимерсинтез”, Владимир) сформировалась научная школа, разработавшая тео-

ретические основы и технологию синтеза АПА методом эмульсионной поликонденсации [2, 3].

В результате нескольких десятилетий исследований были получены сотни ароматических поли- и сополиамидов, уникальные физико-химические свойства которых рассмотрены в ряде подробных обзоров [4–10]. Многообразие ароматических полиамидов связано с комбинациями в строении кислотного и аминного компонентов макромолекулярной цепи. По характеру и последовательности соединения основных структурных фрагментов выделяют: простейшие ароматические полиамиды (полифениленфталамиды) с чередующимися амидными группами и фениленовыми звеньями; мостиковые ароматические полиамиды, между фениленовыми фрагментами которых находятся карбоцепные, карбоциклические или иные группы; ароматические полиамиды с конденсированными ароматическими структурами.

Анализ состояния промышленного производства арамидов и продуктов на их основе показывает, что спустя более полувека к основным коммерчески важным ароматическим полиамидам

можно отнести поли-*m*-фениленизофталамид (ПФИА, МРІА), поли-*p*-фенилентерефталамид (ПФТА, РРТА) и некоторые сополимеры, используемые, прежде всего, при производстве арамидных волокон (например, сополи-*p*-фенилен-3,4'-дифениловый эфир терефталамид (ОДА/ПФТА, ОДА/РРТА, НМ-50)) [11–24].

Уникальные свойства АПА открыли возможности их применения в качестве функциональных и ультрасовременных материалов для изготовления защитной одежды, датчиков, мембран, материалов с электрохромными свойствами и оптической активностью.

### СИНТЕЗ И СТРУКТУРА АРОМАТИЧЕСКИХ ПОЛИАМИДОВ

В растворе поликонденсационные ароматические полиамиды получают двумя основными способами: реакцией между хлорангидридами дикарбоновых кислот и диаминами при низких температурах и прямой конденсацией ароматических дикарбоновых кислот и диаминов при повышенных температурах. В обоих случаях используются полярные аprotонные растворители, такие как N-метил-2-пирролидон, N,N'-диметилформамид или N,N'-диметилацетамид. Из-за высокой температуры плавления АПА не могут быть получены поликонденсацией в расплаве [4]. Установлено, что верхняя температурная граница, позволяющая синтезировать высокомолекулярные АПА первым способом, составляет 70–80°C [3]. Второй способ синтеза в коммерческих целях практически не используется. Аргументом в пользу его проведения является невозможность получения хлорангидридов некоторых дикарбоновых кислот. В этом случае реакция протекает при 110°C в N-метил-2-пирролидоне в присутствии трифенилфосфита, пиридина, хлоридов лития и/или кальция [8].

При синтезе полиамидов методом эмульсионной поликонденсации используется система вода – смешивающийся с ней растворитель (циклогексанон, ТГФ, ДМАА) – неорганическая соль (карбонат натрия). Последняя выполняет также роль акцептора выделяющейся при синтезе соляной кислоты [2, 3].

Причиной существенных отличий свойств полиамидов с *m*- и *p*-фениленовым фрагментами является характер взаимного расположения бензольных циклов и амидных связей, определяющих симметрию формирующейся полимерной структуры, степень ее упорядоченности

и интенсивность межмолекулярных взаимодействий. В случае полиамидов с *m*-фениленовыми группами взаимное расположение фениленовых циклов и амидных групп обуславливает значительные стерические препятствия при образовании водородных связей. Следствием этого является низкая симметрия молекулы. Эта проблема снимается для *p*-фениленфталамидов, большая симметрия макромолекул которых приводит к формированию более упорядоченной структуры [25]. Структура и интенсивные межмолекулярные водородные связи обеспечивают характерные для АПА уникальные механические, термические и химические свойства, в том числе высокую устойчивость к температурному воздействию и органическим растворителям.

В табл. 1 представлены некоторые рассмотренные в литературе структуры АПА.

Данные табл. 2 позволяют получить представление о коммерческом потенциале синтеза мировыми производителями различных АПА.

В начале двухтысячных годов появились работы, продемонстрировавшие возможность получения звездообразных, привитых, разветвленных и гиперразветвленных, а также дендритных полиамидных структур (рис. 1) [7, 26–29]. К уникальным свойствам таких полимеров можно отнести хорошую растворимость и низкую вязкость образующихся растворов, что открывает возможность применения АПА в биотехнологии и медицине в качестве сорбентов, комплексообразователей, катализаторов, наноструктурных систем.

Синтез поли- и сополиамидов на основе сульфосодержащих диаминов, в частности 2,5-диаминобензолсульфоновой кислоты, позволил получить полимеры, в которых ароматическая структура обеспечивает термическую стабильность (>400°C) и химическую стойкость, а заряженные гидрофильные сульфогруппы – протонную проводимость и/или перенос ионов. Подобное сочетание свойств обеспечило применение сульфосодержащих АПА в качестве мембран для топливных элементов, фильтрации воды и окислительно-восстановительных аккумуляторов [30–34].

Работы в направлении усиления стойкости полиамидов к термоокислительной деструкции привели к синтезу полиамидов с азольными ядрами в основной цепи [35–36]. Продуктом

Таблица 1. Мономеры, используемые при синтезе АПА [4]

Мономер	Полимер
$\text{H}_2\text{N}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{COR}$	$-\text{HN}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{COR}$
$\text{H}_2\text{N}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{COR}$	$-\text{HN}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{CO}-$
$\text{H}_2\text{N}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{NH}_2 + \text{ROCO}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{COR}$	$-\text{HN}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{NH}-\text{CO}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{CO}-$

первой стадии реакций в этом случае является полиоксиамид, термическая циклизация которого позволяет получить полибензоксазол. При сохранении хорошей механической прочности подобные материалы могут быть использованы для таких сложных применений, как высокотемпературные газоразделительные про-

цессы, а синтез сульфосодержащего поли(бензоксазол-со-амида) позволил наряду с высокими механическими характеристиками (модуль Юнга 8–10 ГПа, относительное удлинение 3–10%) достичь регулируемой гидрофильтности: величина водопоглощения таких материалов изменяется от 4 до 15% [36].

Таблица 2. Основные производители АПА

Ароматический полiamид			Компания-производитель	Торговая марка	Ссылка
ПФИА	ПФТА	ОДА/ПФТА			
•			DuPont (США)	Kevlar®	11
•				Nomex®	12
•				Filmtec™	13
•			X-FIPER New Material Co. Ltd (КНР)	X-Fiper®	14
	•		China Bluestar Chengrand Co. Ltd (КНР)	Staramid F-218	15
	•		Suzhou Zhaoda Specially Fiber Technical Co. Ltd (КНР)	Aramid 1414	
•			Teijin Aramid B.V. (Нидерланды)	Twaron®	16
•				Teijinconex®	
•				Technora®	
•			Kolon Industries (Республика Корея)	Heracron®	17
•			Hyosung Co. (Республика Корея)	Alkex®	18
•			SRO Group (China) Ltd. (КНР)	Yarn & Thread® Meta-Aramid	
•	•	•	Yantai Tayho Advanced Materials Co. Ltd (КНР)	Taparan® Para-Aramid	19
•				Newstar® Meta-Aramid	20
•	•	•	Yantai Metastar Special Paper Co., Ltd. (КНР)	Metastar Meta Aramid Paper	21
•			Toray Advanced Materials (Республика Корея)	Arawin®	22
•			Huvis Co. (Республика Корея)	MetaOne®	23
•	•		Taekwang Industrial Co. Ltd (Республика Корея)	Aramid	24
•			Kermel (Франция)	Kermel®	

Весьма интересными являются фторпропицедные АПА. Обычно галогены включены в структуру полимеров, обладающих огнезащитными свойствами. В частности, для фторсодержащих полiamидов, синтезированных поликонденсацией 2-(4-трифторметилфенокси)терефталевой кислоты и трифторметилзамещенных ароматических бис(эфир аминов), температура потери 10% массы составляет от 475 до 483°C [37, 7]. Однако в работе [37] показано, что введение в полiamидные макромолекулы достаточно объемной трифторметильной группы, наряду с дифенильными фрагментами и эфирными связями, по-

зволяет достичь хороших газоразделительных характеристик материалов: селективность пропицаемости  $P_{O_2}/P_{N_2}$  равна 7.08,  $P_{CO_2}/P_{CH_4}$  составила 30.25.

Еще одно направление активных исследований связано с синтезом АПА на основе 2,5-фурандикарбоновой кислоты [38, 39]. Изначально разработки имели прежде всего экологическую направленность: замена изофталевой на 2,5-фурандикарбоновую кислоту позволила получить полимеры с пониженной гидролитической устойчивостью амидной связи в щелочных

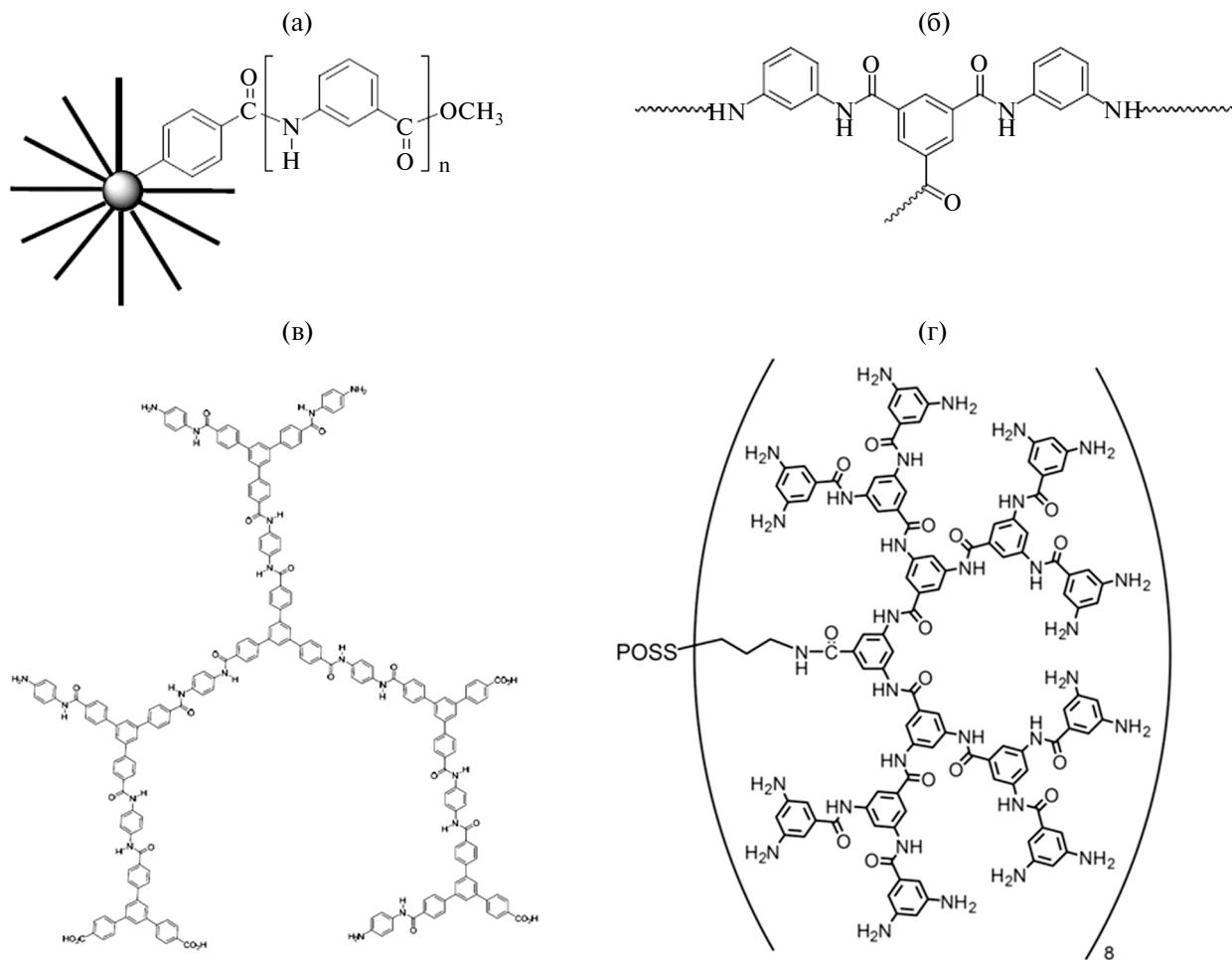


Рис. 1. Звездообразные (а), разветвленные (б), гиперразветвленные (в), дендритные (г) ароматические полиамиды.

средах, что открывает возможности их химической переработки, в том числе в замкнутом цикле. Серьезность проблем, связанных с сырьем и переработкой полиамидов, трудно переоценить, т.к. по экспертным оценкам с шестидесятых годов прошлого века мировое производство этих полимеров почти удвоилось, достигнув 890 млн тонн в 2023 году. Причем ожидается удвоение этого значения в течение следующих 20 лет [38]. Синтезированные на основе 2,5-фурандикарбоновой кислоты полиамиды обладают сопоставимыми или превосходящими термическими, механическими и разделительными свойствами (по сравнению с полимерами на основе изофталевой кислоты): температура потери 5% массы — выше 397.6°C, прочность на разрыв и удлинение при разрыве образцов — 114.7 МПа и 6.92% соответственно, модуль Юнга — 4.221 ГПа, проницаемость по кислороду — 57.828 см<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>·сутки·Па.

## ПРИМЕНЕНИЕ АРОМАТИЧЕСКИХ ПОЛИАМИДОВ. МЕМБРАННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Характеризуя сложившуюся на рынке ситуацию и перспективы применения АПА, можно выделить два принципиальных подхода, реализация которых определяет направление современных исследований: синтез полимеров и создание материалов, в которых усиливаются ключевые преимущества полимеров этого класса и поиск возможностей придания полиамидам специфических, не характерных для них свойств. Последнее легло в основу создания оптических, электро-активных и “умных” материалов. Для улучшения свойств АПА используют три основные стратегии: сшивка, применение новых мономеров, химическая модификация [40–42].

На протяжении последних тридцати лет ароматические полиамиды рассматривались как

перспективные системы для получения мембран разной структуры. В табл. 3 представлена информация по отечественным (начиная с 1989 г.) и зарубежным (начиная с 1999 г.) патентным документам, опубликованным в открытом доступе.

Способность полиамидов к структурной трансформации за счет изменения состава и строения диаминных и дикислотных мономеров определяет столь широкий круг областей мембранныго разделения, в которых материалы на основе АПА нашли применение, причем полимер может выполнять роль как мембранообразующей основы, так и формировать ультратонкий слой на матрице любой природы.

При получении газоразделительных мембран востребованными оказались полимеры как промышленно производимые HR95PP® (Dow Corporation, США), TFC-88821UL® (Fluid Systems Corporation, США), TS80® (TriSep Corporation, США) [93], так и целенаправленно синтезированные для решения конкретных задач, связанных с выделением индивидуальных газов и/или разделением смесей  $\text{CO}_2/\text{CH}_4$ ,  $\text{O}_2/\text{N}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}/\text{N}_2$  [94–101].

Основные проблемы, долгое время ограничивающие использование ароматических полиамидов для получения газоразделительных мембран, во-первых, носили технологический характер и были связаны с их низкой растворимостью и чрезвычайно высокими температурами плавления, что затрудняло получение тонких пленок или селективных покрытий, во-вторых, диктовались особенностями структурной организации АПА: жесткость цепей и интенсивные межмолекулярные взаимодействия определяли высокую плотность упаковки макромолекул и, как следствие, низкие значения свободного объема.

Способом решения обозначенных проблем стала модификация химической структуры полиамидов. Включение в макромолекулярную цепь гибких мостиковых групп, таких как  $-\text{O}-$ ,  $-\text{CH}_2-$ ,  $-\text{CO}-$ , способствовало улучшению растворимости полимеров. Введение объемных заместителей – препятствовало плотной упаковке полимерных цепей, приводя к увеличению свободного объема, а сочетание рыхлой структуры и высокой жесткости макромолекул позволило получить перспективные газоразделительные материалы [94]. К используемым при молекулярном конструировании полиамидов объемным

заместителям можно отнести фторсодержащие группы  $(-\text{CF}_3)$  [95–96], адамантан [97–99] и триильные группы [100]. Схема, представленная на рис. 2, показывает характер влияния объемных групп на структуру АПА.

Однако введение объемных групп приводит, как правило, к снижению механических, а в ряде случаев и термических свойств АПА, что негативно сказывается на возможности работы материалов при высоких давлениях и температурах. В качестве альтернативного решения было предложено использование гибридных систем на основе полиамидной матрицы и неорганического, в том числе нано-, наполнителя [100], а в работе [101] показана возможность применения самих АПА как сырья при получении молекулярных сит методом пиролиза.

В работе [102] рассмотрено влияние структуры ароматических полиамидных ионенов, включающих имидазольные фрагменты, на газотранспортные характеристики мембран. Авторы показали, что производные, содержащие терефталамидные сегменты, обладали наивысшей селективностью при разделении смесей  $\text{CO}_2/\text{CH}_4$  и  $\text{CO}_2/\text{N}_2$ , что указывает на целесообразность сочетания структурных особенностей полиамидов и функциональных групп ионных компонентов.

В процессах первапорации АПА продемонстрировали эффективность при разделении водно-спиртовых смесей [103–107]. Было показано, что скорость удаления воды из смесей в значительной степени зависит от наличия в полимерной основе объемных групп [103–105]. Оценка характера влияния природы объемных групп полимера на морфологию свободного объема, сорбционные и транспортные свойства материалов методами молекулярного моделирования представлена в работе [103]. В работе [107] сравнительное исследование эффективности разделения смесей вода/этанол различного состава на мембранах на основе 5-третбутилизофталевой кислоты с 2,2-бис(4-(4-аминофенокси)фенил)гексафторпропаном (F-арамид) и с 2,2-бис(4-(4-аминофенокси)фенил)пропаном (Н-арамид) показало, что коэффициент разделения Н-арамида выше и составляет 60 при значении проницаемости  $293 \text{ г}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{ч}^{-1}$  ( $25^\circ\text{C}$ , 90 мас.% этанола).

Полиамиды активно используются при производстве широкого спектра нанофильтрационных и обратноосмотических мембран [108–112]. Всплеск интереса к этим полимерам в значительной степени был связан с разработкой технологии

Таблица 3. Мембранные на основе ароматических поли- и сополиамидов\*

Мембранный процесс	Полиамид	Организация/компания-разработчик	Ссылка
Патентные документы СССР и РФ			
Ультрафильтрация	поли- <i>m</i> /п-фенилен-изо/терефталамид	ИФОХ АН БССР	43–46
Электродиализ	АПА	НИФХИ им. Л.Я. Карпова	47, 48
Первапорация	сульфонатсодержащий ароматический сополиамид	АО “Полимерсинтез”	49, 50
Газоразделение	сульфонатсодержащий ароматический сополиамид	ЗАО НТЦ “Владипор”	51
Газоразделение	сульфонатсодержащий ароматический сополиамид		52–56
Обратный осмос	АПА	ЗАО РМ “Нанотех”	57
Нанофильтрация, прямой/обратный осмос	АПА	Аквапорин А/С (DK)	58
Зарубежные патентные документы			
Обратный осмос	АПА	Hydranautics, Япония	59
Ультрафильтрация, обратный осмос	поли- <i>m</i> -фениленизофталамид	Nok Corp., Япония	60, 66
Микрофильтрация, ультрафильтрация, обратный осмос, газоразделение	поли- <i>m</i> -фениленизофталамид	Teijin Ltd., Япония	61, 62, 64, 75, 85
Ультрафильтрация	АПА	Nitto Denko Corp., Япония	63
Ультрафильтрация	поли- <i>m</i> -фениленизофталамид	Takeshi Sasaki, Япония	65
Нанофильтрация, обратный осмос	АПА	Toray Ind., Япония	67, 71, 73, 76, 82
Обратный осмос	АПА	Coway Co. Ltd., Корея	68
Микрофильтрация, ультрафильтрация	Сополиамид	Kuraray Co. Ltd., Япония	69
Обратный осмос	АПА	Kolon Inc., Республика Корея	70
Обратный осмос, диализ, первапорация	АПА	The Ohio States University Research Foundation, США	72
Нанофильтрация	поли- <i>m</i> -фениленизофталамид	Research Center for Eco Environmental Sciences of CAS, КНР	74
Ультрафильтрация	поли- <i>m</i> -фениленизофталамид	Microvast Power Systems Huzhou Co Ltd., КНР	77
Ультрафильтрация, топливные элементы	АПА	Weihong Advanced Membrane Co., КНР	78, 80
Электродиализ	АПА	Changzhou Ming Zhuo New Mstar Technology Ltd., Changzhou University, КНР	79
Ультрафильтрация	поли- <i>m</i> -фениленизофталамид	China Lucky Group Corp, КНР	81
Ультрафильтрация, обратный осмос	поли- <i>m</i> -фениленизофталамид	Shanghai Institute of Technology, КНР	83, 84

Таблица 3. Окончание

Мембранный процесс	Полиамид	Организация/компания-разработчик	Ссылка
Газоразделение	АПА	Ube Corp, Япония	86–88
Обратный осмос, нанофильтрация	Многослойная мембрана TFC: полиамид, ароматический полиамид	King Abdulaziz City for Science and Technology KACST International Business Machines Corp., США	89
Обратный осмос, нанофильтрация	Сшитый АПА	Aquaporin A/S, Дания	90
Обратный осмос, нанофильтрация	Композитная мембрана. Сшитый полиамид алифатический/ароматический	Dow Global Technologies LLC, США	91
Обратный осмос	АПА	Toray Chemical Korea Inc., Республика Корея	92

\* Для получения информации использовались электронные ресурсы <https://yandex.ru/patents>, <https://patents.google.com/>.

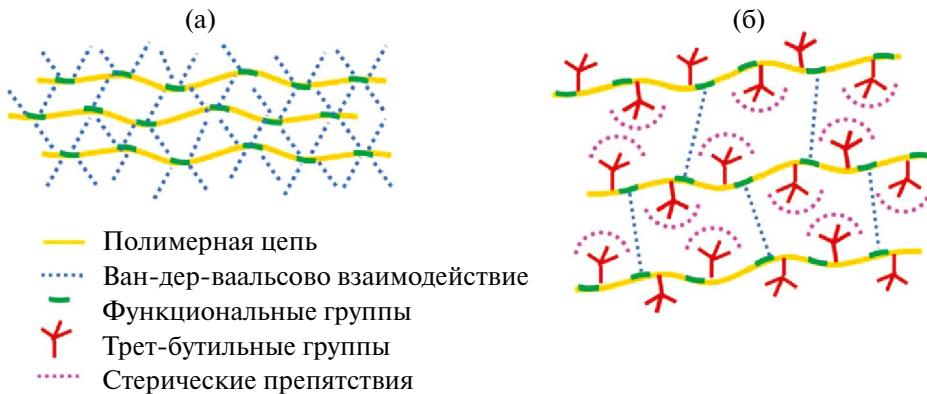


Рис. 2. Схема расположения цепей и межмакромолекулярных взаимодействий в АПА в отсутствие (а) и в присутствии (б) объемных трет-бутильных групп [94].

синтеза тонкопленочных композитных (TFC) и нанокомпозитных (TFN) мембран [113–115]. Полиамиды, являясь продуктами межфазных реакций, составили основу подобных систем. Классическими мономерами для обратноосмотических TFC-мембран стала пара м-фениледиамин/тримезоилхлорид [116–117], а для нанофильтрационных мембран — пиперазин/тримезоилхлорид [118–121]. По мнению авторов, использование мономеров, содержащих аминогруппы с более низкой реакционной способностью, таких как пиперазин, приводит к формированию более линейноподобных полимерных структур с относительно низкой степенью сшивки, что способствует образованию менее плотной и более проницаемой пленки полиамида [118].

Ключевым преимуществом тонкопленочных мембран являлась высокая удельная производительность, однако более поздние исследования показали, что введение в разделительный слой

нанонаполнителей различной природы: цеолитов NaA и NaX; алюмосиликатных, углеродных и титановых нанотрубок; диоксида кремния; частиц серебра и алcoxидов металлов, — во-первых, регулируя гидрофобно/гидрофильтрующие и электроповерхностные свойства материала, позволяет улучшить его разделительные характеристики без ущерба для высокой производительности тонкопленочной мембраны [110, 113], а во-вторых, — обеспечить возникновение у материалов новых свойств. В частности, для используемых при орошении воды полиамидных обратноосмотических мембран актуальной является задача повышения стойкости к воздействию хлора. Один из путей решения этой проблемы — получение гибридных мембран, в состав которых входят наночастицы диоксида кремния [122–124]. В работе Zhao H. и др. [125] было показано, что введение в полиамид многостенных углеродных нанотрубок, функционализированных карбоксилатными компонентами, может значи-

тельно улучшить не только устойчивость к хлору, но и повысить стойкость к загрязнению.

Важным является возможность применения тонкопленочных полиамидных мембран для фильтрации органических сред [110]. По сравнению с обычным разделением, фильтрация неводных систем является интересной альтернативой с точки зрения безопасности и экологии. Активным потребителем таких мембран может стать фармацевтическая промышленность, использующая большое количество органических растворителей в качестве реакционной среды при производстве активных фармацевтических соединений. В работе [126] рассмотрена возможность получения устойчивых к растворителям нанофильтрационных мембран на основе мономерной системы м-фениледиамин/тримезоилхлорид путем введения функционализированных наночастиц цеолита UZM-5 в диапазоне концентраций 0–0.2 мас.%. По мнению авторов, функционализированные цеолиты способны взаимодействовать с мономерами тримезоилхлорида с образованием сшитой структуры TFN-мембраны (рис. 3).

Приданье материалу антибактериальных свойств – еще одна задача, на решение которой направлена технология создания TFN-мембран. На рис. 4 представлена схема получения тонкопленочной полиамидной мембраны, в структуру которой включены наночастицы серебра [127].

Одной из проблем для нанофильтрационных мембран является достижение высокой селективности относительно одновалентных ионов. В работе [128] показана возможность получения новой нанофильтрационной мембраны на основе м-фениледиамина на устойчивой к растворителям матрице из нановолокнистого гидрогеля Kevlar

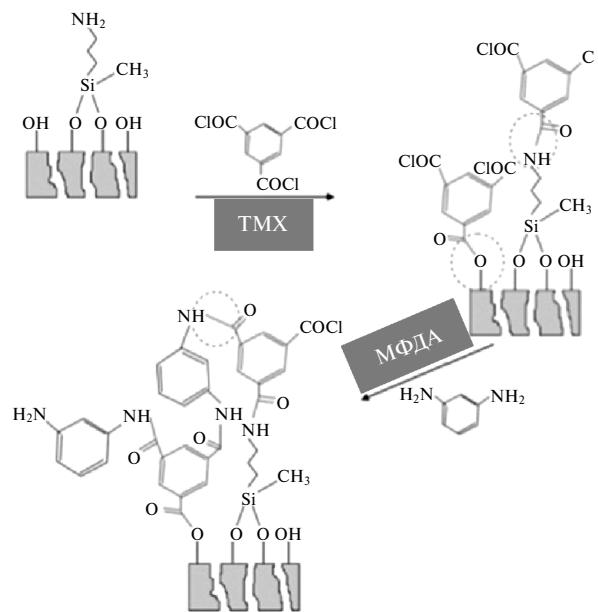


Рис. 3. Схема формирования TFN-мембраны на основе системы м-фениледиамин/тримезоилхлорид/функционализированные цеолиты [98].

с последующей активацией поверхности мембраны с использованием N-диметилформамида. При селективности по  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  и  $\text{MgSO}_4$ , равной 100 и 99.4% соответственно ( $C = 1 \text{ г/л}$ ,  $p = 6 \text{ бар}$ ,  $T = 25^\circ\text{C}$ ) мембрана по водопроницаемости на порядок превосходит полученную из полим-м-фениленизофталамида).

Интерес вызывают работы, в которых рассматривается возможность получения мембран на основе арамидных нановолокон (ANF) [129–131]. Подобные системы демонстрируют возможности “настраиваемых” параметров структуры, химической/физической стабильности, гидрофобности/гидрофильности. Полученные мембранные показали свою эффективность как в процессах во-

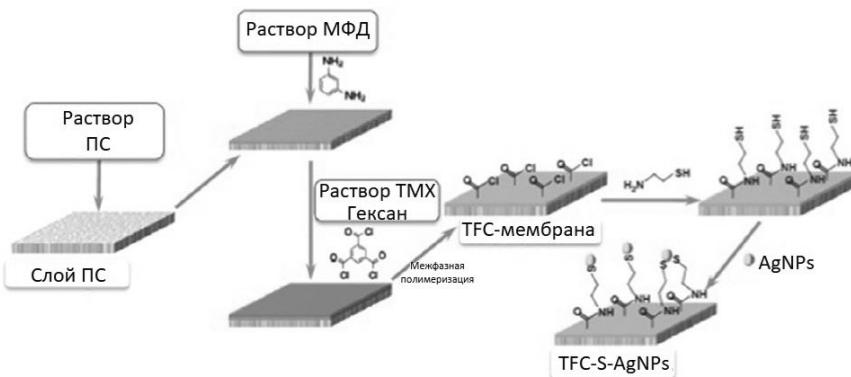


Рис. 4. Схема формирования TFN-мембраны на основе системы м-фениледиамин/тримезоилхлорид/наночастицы серебра [99].

доподготовки и водоочистки (разделение нефти и воды, опреснение воды, удаление красителей из сточных вод), так и при очистке органических растворителей, разделении ионов, в качестве ионообменных материалов.

Можно выделить несколько основных направлений исследований, целью которых является получение ультра- и микропористых мембран на основе АПА [132–138]. Первое связано с поиском возможностей регулирования массообменных характеристик пористых мембран и их поверхностных свойств путем изменения соотношения основного и кислотного компонентов в процессе синтеза полимера [44–46] или при его химической модификации [134]. Второе – с получением мембран на основе ANF [135–138]. Обладая высокой удельной площадью поверхности, превосходными механическими и термическими свойствами, арамидные нановолокна широко используются в качестве новых nanoстроительных блоков для изготовления высокопрочных материалов, а также как нанонаполнители для смешивания с полимерами. По мнению авторов, одним из преимуществ мембран на основе ANF является пониженная адсорбционная активность по белкам и хорошая гемосовместимость [135, 138].

Важная особенность полиамидных материалов – наличие на поверхности функциональных групп: карбоксильной, аминной и амидной. Карбоксильная и аминная являются концевыми группами в макромолекулах и их количество и соотношение можно варьировать при синтезе [139]. Эти группы определяют электроповерхностные свойства мембраны и создают условия для иммобилизации активных компонентов различной природы, регулируя гидрофильность материала и придавая ему специфические характеристики. В частности, показано, что модификация полиамидного материала полиэлектролитами, содержащими аминогруппы, приводит к значительному снижению загрязнения мембран [140], а иммобилизация на поверхности амифильных ароматических полиамидных дендримеров открывает возможность формирования активного слоя мембраны с регулируемыми разделительными свойствами [141].

Отдельного рассмотрения заслуживает анализ возможности использования для получения мембран функционализированных ароматических поли- и сополиамидов.

Введение в макромолекулу АПА ионных групп является инструментом изменения не только их гидрофильности и массообменных характеристик [102, 111, 142], но и адсорбционных и антибактериальных свойств [143].

Начиная с конца прошлого века появилось более сотни работ, в которых была показана возможность и продемонстрирована эффективность применения для изготовления мембран синтезированных в АО “Полимерсинтез” сульфонатсодержащих ароматических поли- и сополиамидов [144–145]. Их уникальность заключалась в варьировании концентрации ионных групп в макромолекулярной цепи от 1 до 100 мол.%, что позволило получить линейку полимеров от растворимых в амидных растворителях до водорастворимых, а строение аминного и хлорангидридного компонентов открыло возможность регулирования свойств мембран за счет структуры и конформационного состояния макромолекул полиамидов. На основе этих полимеров были получены ионообменные [146], газоразделятельные [147], первапорационные [148], ультрафильтрационные [149] мембранны. Был проведен ряд исследований, продемонстрировавших возможность направленного конструирования высокоселективных мембран для газоразделения, первапорации и ультрафильтрации на основе интерполиэлектролитных комплексов, включающих сульфонатсодержащие ароматические полиамиды различного строения и состава и полиамины с первичными, вторичными, третичными и четвертичными аминогруппами [150].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Несмотря на достаточно продолжительную историю лабораторного и промышленного синтеза и исследований свойств получаемых материалов, ароматические полиамиды до настоящего времени обладают существенным потенциалом и с точки зрения поиска новых возможностей применения, и в части наращивания объемов производства.

Уникальные свойства этих полимеров: хорошие физико-механические характеристики, термическая и химическая стойкость, а также наличие инструментов, в том числе и на этапе синтеза, позволяющих их регулировать, делают полимеры привлекательными не только для таких традиционных отраслей, в которых они уже активно используются (машиностроение, авиационная и оборонная промышленность), но и для новых, таких как биотехнология, медицина, создание оптически-, электроактивных

и “умных” материалов. К числу последних, безусловно, относятся мембранны. Если рассматривать полимерные мембранны как химически гетерогенные канальные наноструктуры, то возможности варьирования конфигурации полиамидных макромолекул за счет строения аминного и хлорангидридного компонентов, а также природы и содержания ионных групп как путь направленного конструирования каналов для трансмембранных переноса компонентов различной природы позволяют определять эти полимеры как базовые для мембран различного назначения. Наличие в ароматических полиамидах функциональных групп и возможности регулирования гидрофобно/гидрофильных свойств материалов создают практически неисчерпаемый потенциал их модификации, открывая перспективы создания в том числе гибридных систем, демонстрирующих новые привлекательные свойства, связанные, в частности, с устойчивостью к загрязнению и долговечностью материала. В свою очередь, введение в структуру макромолекулы объемных групп, таких как трет-бутильные, можно рассматривать как один из шагов в создании высокоеффективных газоразделительных материалов. Однако возможности “проектирования” полиамидных мембранны для разделения газов еще не исчерпаны. Пристального внимания заслуживает получение мембранны на основе арамидных нановолокон, демонстрирующих высокие разделительные характеристики, хорошую электропроводность и регулируемую адсорбционную активность. Пока применение ANF находится на ранней стадии, и предстоит пройти определенный путь, прежде чем эти материалы получат широкое практическое применение.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках государственного задания в сфере научной деятельности Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема FZUN-2024-0004, госзаключение ВлГУ).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *E. I. du Pont de Nemours & Co, Inc.* Пат. Belgium. № 569760, 1958.
2. Соколов Л.Б., Герасимов В.Д., Савинов В.М., Беляков В.К. Термостойкие ароматические полиамиды. М.: Химия, 1975. 253 с.
3. Соколов Л.Б. Основы синтеза полимеров методом поликонденсации. М.: Химия, 1979. 263 с.
4. Михайлин Ю.А. Термоустойчивые полимеры и полимерные материалы. Критерии оценки, получение, свойства, применение. СПб.: Профессия, 2006. 624 с.
5. Trigo-Lopez M., Estevez P., San-Jose N., Gomez-Valdemoro A., Garcia F., Serna F., De la Pena J.L., Garcia J.M. // Recent Pat. Mater. Sci. 2009. V. 2 (3). P. 190.
6. Garcia J.M., Garcia F.C., Serna F., De la Pena J.L. // Prog. Polym. Sci. 2010. V. 35. P. 623.
7. Reglero-Ruiz J.A., Trigo-Lopez M., Garcia F.C., Garcia J.M. // Polymers. 2017. V. 9. P. 414.
8. Trigo-López M., García J.M., Ruiz J.A.R., García F.C. Ferrer R. Eds. Aromatic Polyamides // Encyclopedia of Polymer Science and Technology. Wiley, Hoboken. 2018.
9. Дориомедов М.С. // Научно-технический журнал „Труды ВИАМ“. 2020. № 11 (93). С. 48. URL: [http://viam-works.ru/plugins/content/journal/uploads/articles/pdf/2020\\_11.pdf](http://viam-works.ru/plugins/content/journal/uploads/articles/pdf/2020_11.pdf) (дата обращения: 22.05.2024).
10. Малышев А.Н., Маяцкий В.А., Иванов В.М., Баженов И.Г. // Композитный мир. 2023. URL: <https://compositeworld.ru/articles/materials/id64fad2e04e6d820013864e48> (дата обращения: 22.05.2024).
11. DuPont de Nemours, Inc. URL: [https://www.dupont.com/content/dam/dupont/amer/us/en/safety/public/documents/en/Kevlar\\_Technical\\_Guide\\_0319.pdf](https://www.dupont.com/content/dam/dupont/amer/us/en/safety/public/documents/en/Kevlar_Technical_Guide_0319.pdf) (дата обращения: 22.11.2024).
12. DuPont de Nemours, Inc. URL: [https://www.dupont.com/content/dam/dupont/amer/us/en/safety/public/documents/en/Nomex\\_414\\_Technical\\_Data\\_Sheet.pdf](https://www.dupont.com/content/dam/dupont/amer/us/en/safety/public/documents/en/Nomex_414_Technical_Data_Sheet.pdf) (дата обращения: 22.11.2024).
13. DuPont de Nemours, Inc. URL: <https://www.dupont.com/content/dam/dupont/amer/us/en/water-solutions/public/documents/en/RO-NF-FilmTec-Manual-45-D01504-en.pdf> (дата обращения: 22.11.2024).
14. X-FIPER New Material Co., Ltd. URL: <http://www.sro.com.cn/en/wp-content/uploads/2022/03/X-FIPER-Meta-Aramid-Fiber.pdf> (дата обращения: 22.11.2024).
15. China National Bluestar (Group) Co., Ltd. URL: <http://www.china-bluestar.com/28156.html> (дата обращения: 22.11.2024).
16. Teijin Ltd. URL: <https://www.teijinaramid.com/en/expertise/what-is-aramid> (дата обращения: 22.11.2024).
17. Kolon Industries, Inc. URL: <https://www.kolonindustries.com/file/view?fileSeq=3008&fileOrd=1> (дата обращения: 22.11.2024).
18. Hyosung Japan Co., Ltd. URL: <https://www.hyosung.co.jp/en/production/industrial/aramid/> (дата обращения: 22.11.2024).
19. Yantai Tayho Advanced materials Co., Ltd. URL: <http://en.tayho.com.cn/product/Product%20Properties2.htm> (дата обращения: 22.11.2024).

20. Yantai Tayho Advanced materials Co., Ltd. URL: <http://en.tayho.com.cn/product/Product%20Properties1.htm> (дата обращения: 22.11.2024).
21. Yantai Metastar Special Paper Co., Ltd. URL: <https://en.metastar.cn/product/7/> (дата обращения: 22.11.2024).
22. Toray Advanced Materials Korea, Inc. URL: [https://www.torayamk.com/en/product/product\\_view.asp?id=5](https://www.torayamk.com/en/product/product_view.asp?id=5) (дата обращения: 22.11.2024).
23. Huvis Corp. URL: [https://www.huvis.com/eng/product/ProductDetail.asp?product\\_seq=422&cate\\_seq=1700&cate2\\_seq=1701](https://www.huvis.com/eng/product/ProductDetail.asp?product_seq=422&cate_seq=1700&cate2_seq=1701) (дата обращения: 22.11.2024).
24. Taekwang Industrial Co., Ltd. URL: [http://www.tae-kwang.co.kr/en/product/product\\_4\\_1.asp](http://www.tae-kwang.co.kr/en/product/product_4_1.asp) (дата обращения: 22.11.2024).
25. Цветков В.Н. Жесткоцепные полимерные молекулы. Л.: Наука, 1986. 379 с.
26. Ohishi T., Masukawa T., Fujii S., Yokoyama A., Yokoza-wa T. // Macromolecules. 2010. V. 43. P. 3206.
27. Hu X. // J. Appl. Polymer Sci. 2016. V. 134. P. 44505.
28. Park S.Y., Kim S.G., Chun J.H., Chun B.H., Kim S.H. // Desalination Water Treat. 2012. V. 43. P. 221.
29. Matsumoto K., Nishi K., Andoa K., Jikei M. // Polym. Chem. 2015. V. 6. P. 4758.
30. Taeger A., Vogel C., Lehmann D., Jehnichen D., Komber H., Meier-Haack J., Ochoa N.A., Nunes S.P., Peinemann K.-V. // React. Funct. Polym. 2003. V. 57. P. 77.
31. Hou H., Di Vona M.R., Knauth P. // J. Membr. Sci. 2012. V. 423–424. P. 113.
32. Paul M., Jons S.D. // Polymer. 2016. V. 103. P. 417.
33. Gao J., Wang Y., Norder B., Garcia S.J., Picken S.J., Madsen L.A., Dingemans T.J. // J. Membr. Sci. 2015. V. 489. P. 194.
34. Fridman-Bishop N., Freger V. // J. Membr. Sci. 2017. V. 540. P. 120.
35. Ye L., Jie X., Wang L., Xu G., Sun Y., Kang G., Cao Y. // Sep. Purif. Technol. 2021. V. 257. № 117870.
36. Fraser A.C., Hegde M., Lohuis P.A.M., Dingemans T.J. // Polymer. 2024. V. 290. № 126569.
37. Bandyopadhyay P., Bera D., Banerjee S. // Sep. Purif. Technol. 2013. V. 104. P. 138.
38. Feng Y., Li X., Ma T., Li Y., Ji D., Qin H., Fang Z., He W., Guo K. // Green Chem. 2024. V. 26. P. 5556.
39. Ye Z., Liu Y., Chen W., Yu Z., Fang Y., Zhou X., He Y., Wang Y., Tang Z. // Eur. Polym. J. 2024. V. 210. № 112935.
40. Trigo-Lopez M., Barrio-Manso J.L., Serna F., Garcia F.C., Garcia J.M. // Macromol. Chem. Phys. 2013. V. 214. P. 2223.
41. Trigo-Lopez M., Pablos J.L., Munoz A., Ibeas S., Serna F., Garcia F.C., Garcia J.M. // Polym. Chem. 2015. V. 6. P. 3110.
42. Barrio-Manso J.L., Calvo P., Garcia F.C., Pablos J.L., Torroba T., Garcia J.M. // Polym. Chem. 2013. V. 4. P. 4256.
43. Бильдюкович А.В., Праценко С.А., Артамонов В.А., Баран Г.М. Пат. СССР. № 1677045, заявл. 03.01.1989; опубл. 15.09.1991.
44. Бильдюкович А.В., Праценко С.А., Солдатов В.С. Пат. СССР. № 1757726, заявл. 02.01.1990; опубл. 30.08.1992.
45. Касперчик В.П., Бильдюкович А.В., Праценко С.А., Солдатов В.С. Пат. СССР. № 1813011, заявл. 05.03.1990; опубл. 30.04.1993.
46. Касперчик В.П., Бильдюкович А.В., Святченко В.В., Солдатов В.С. Пат. СССР. № 1789254, заявл. 05.03.1990; опубл. 23.01.1993.
47. Кирил Ю.Э., Федотов Ю.А., Зотова Н.И., Кулинцов П.И., Бобрешова О.В., Светличный И.Б., Смирнов С.А., Фатеев Н.Н., Гитис С.С., Попков Ю.М., Тимашев С.Ф. Пат. СССР. № 1800825, заявл. 18.12.1989; опубл. 27.08.1996.
48. Кирил Ю.Э., Семина Н.В., Федотов Ю.А., Гитис С.С., Атрощенко Ю.М., Шахкельдян И.В., Януль Н.А., Тимашев С.Ф. Пат. РФ. № 2074204, заявл. 27.01.1993; опубл. 27.02.1997.
49. Кирил Ю.Э., Федотов Ю.А., Семенова С.И., Смекалов В.Т., Смирнова Н.Н., Вдовин П.А., Тимошов С.Ф., Дубяга В.П., Поворов А.А. Пат. РФ. № 2074020, заявл. 22.11.1993; опубл. 27.02.1997.
50. Семенова С.И., Вдовин П.А., Платонов К.Н., Якусева Н.Н., Каракецов В.Г. Пат. РФ. № 2065321, заявл. 12.04.1993; опубл. 20.08.1996.
51. Каракецов В.Г., Вдовин П.А., Дубяга В.П. Пат. РФ. № 2354443, заявл. 18.09.2007; опубл. 10.05.2009.
52. Шевлякова Н.В., Бузин А.В., Кубасов В.Н., Серебряков В.Н., Тверской В.А., Федотов Ю.А., Гитис С.С., Рябоконь В.Н., Субботин В.А. Пат. СССР. № 1760754, заявл. 27.04.1990; опубл. 20.03.2000.
53. Бузин А.В., Кубасов В.Н., Серебряков В.Н., Тверской В.А., Федотов Ю.А., Шевлякова Н.В. Пат. СССР. № 1767859, заявл. 27.04.1990; опубл. 20.03.2000.
54. Дьякова М.Г., Тверской В.А., Федотов Ю.А., Шевлякова Н.В., Серебряков В.Н., Кубасов В.Н., Бузин А.В., Бобылев А.А. Пат. СССР. № 1767860, заявл. 27.04.1990; опубл. 20.03.2000.
55. Тверской В.А., Федотов Ю.А., Каракецов В.Г., Шевлякова Н.В., Кубасов В.Н., Серебряков В.Н., Бузин А.В., Семенова С.И., Ковылина Г.Д. Пат. СССР. № 1793713, заявл. 27.04.1990; опубл. 20.03.2000.
56. Федотов Ю.А., Шевлякова Н.В., Бузин А.В., Кубасов В.Н., Серебряков В.Н., Тверской В.А., Зайцев Е.Н. Пат. СССР. № 1807707, заявл. 27.04.1990; опубл. 20.03.2000.

57. Дубяга В.П., Дзюбенко В.Г., Вдовин П.А., Шишова И.И., Жданова О.Е. Пат. РФ. № 2498845, заявл. 12.03.2012; опубл. 20.11.2013.
58. Спульбер М., Тиаскус К. Пат. РФ. № 2749848, заявл. 06.02.2017; опубл. 17.06.2021.
59. Tomaschke J.E. Пат. USA. № US6464873, заявл. 15.06.1999; опубл. 15.10.2002.
60. Uda T. Пат. Japan. № JP2001286743A, заявл. 10.04.2000; опубл. 16.10.2001.
61. Ohno T., Sadanobu J., Nakamura T., Honda S., Ishiwata T. Пат. WIPO. № WO2001019906A1, заявл. 12.09.2000; опубл. 22.03.2001.
62. Ono T., Sadanobu J. Пат. Japan. № JP2001206973A, заявл. 28.01.2000; опубл. 31.07.2001.
63. Obara T., Hirose M., Shintani T. Пат. Japan. № JP2003080042, заявл. 10.09.2001; опубл. 18.03.2003.
64. Sasaki T., Matsumura S., Kido N. Пат. Japan. № JP2004115764A, заявл. 30.09.2002; опубл. 15.04.2004.
65. Sasaki T., Kido N., Matsumura S. Пат. WIPO. № WO2004024808A1, заявл. 12.09.2003; опубл. 25.03.2004.
66. Uda T. Пат. WIPO. № WO2004024305A1, заявл. 29.08.2003; опубл. 25.03.2004.
67. Taniguchi M., Murakami M. Пат. Japan. № JP2005028220, заявл. 08.07.2003; опубл. 03.02.2005.
68. Yoo J.K., Lee S.Y., Kim Y.K. Пат. WIPO. № WO2007035019A1, заявл. 26.12.2005; опубл. 29.03.2007.
69. Yamamoto Y., Nakatsuka S., Moriguchi N., Komatsu K. Пат. Japan. № JP2005193193, заявл. 09.01.2004; опубл. 21.07.2005.
70. Yoo J.H., Chengxue C., Guangzhen L. Пат. China. № CN101228214, заявл. 08.08.2006; опубл. 23.07.2008.
71. Nishihara K., Sueoka M., Tsukuda A. Пат. Japan. № JP2008106261, заявл. 27.09.2007; опубл. 08.05.2008.
72. Winston H.W.S. Пат. USA. № US20080296225, заявл. 17.07.2008; опубл. 04.12.2008.
73. Sasaki T., Mitsuhasha T., Takagi K., Oto K. Пат. WIPO. № WO2011078047A1, заявл. 16.12.2010; опубл. 30.06.2011.
74. Zhaokun L., Tao W., Changwei Z., Zhiping J., Jun W., Deyin H. Пат. China. № CN102847450A, заявл. 30.06.2011; опубл. 02.01.2013.
75. Tanikawa N., Honmoto H. Пат. Japan. № JP6072368B1, заявл. 10.12.2015; опубл. 01.02.2017.
76. Ogawa T., Shimura H., Furuno S., Takaya K., Sasaki T., Kimura M. Пат. WIPO. № WO2016002821A1, заявл. 30.06.2015, опубл. 07.01.2016.
77. Sun Q., Shen D., Shen Z., Wu H., Li X. Пат. China. № CN107029564B, заявл. 03.02.2016; опубл. 11.08.2017.
78. Sun Q., Li X., Huang H. Пат. China. № CN108341987B, заявл. 21.01.2017; опубл. 31.07.2018.
79. Wang C., Cao S., Xu C. Пат. China. № CN106810861A, заявл. 08.02.2017; опубл. 09.06.2017.
80. Sun Q., Huang H., Li W., Li X. Пат. China. № CN111224042B, заявл. 07.09.2017; опубл. 02.06.2020.
81. Meng X., Liu Y., Jiang X., Guo Y., Ding Y., Chen Y., Zhao W. Пат. China. № CN109012236B, заявл. 07.08.2018; опубл. 18.12.2018.
82. Yoshizaki T., Hamada T., Okabe J., Ogawa T. Пат. WIPO. № WO2018198679A1, заявл. 30.03.2018; опубл. 01.11.2018.
83. Chen G., Chen Z., Xie H., Li Y., Wan J., Liu L., Wang Y., Xu Z. Пат. China. № CN112569811B, заявл. 22.11.2020; опубл. 10.02.2023.
84. Chen G., Xie H., Chen Z., Li Y., Wan J., Liu L., Wang Y., Xu Z. Пат. China. № CN112121642A, заявл. 14.09.2020; опубл. 25.12.2020.
85. Sonehara S., Zhou Z.Y., Yamaguchi Y., Sato Y., Toritsu S. Пат. Japan. № JP2023134910A, заявл. 15.03.2022; опубл. 28.09.2023.
86. Kanetsuki Y., Tanihara N., Nakamura T. Пат. USA. № US9718023B2, заявл. 03.11.2011; опубл. 01.08.2017.
87. Yoshinaga T., Fukunaga K., Kanetsuki Y., Uchida H., Shigemura M., Tanihara N. Пат. Japan. № JP2006198589A, заявл. 24.01.2005; опубл. 03.08.2006.
88. Yoshinaga T., Nakamura M., Kanougi T., Kase Y., Fukunaga K. Пат. WIPO. № WO2010038810A1, заявл. 30.09.2009; опубл. 08.04.2010.
89. Alrasheed R.A., Davis B.W., Diep J.T., Dubois G.J., Na Y.H., Nassar M.S., Vora A. Пат. USA. № US20130327714A1, заявл. 07.06.2012; опубл. 12.12.2013.
90. Mentzel S., Perry M.E., Vogel J., Braekevelt S., Geschke O., Larsen M.E.S. Пат. WIPO. № WO2014128293A1, заявл. 24.02.2014; опубл. 28.08.2014.
91. Niu J.Q., Mickols W.E. Пат. WIPO. № WO2007127605A2, заявл. 10.04.2007; опубл. 08.11.2007.
92. Koo J.Y., Hong S.P. Пат. South Korea. № KR100894495B1, заявл. 30.03.2007; опубл. 05.10.2007.
93. Kosutik K., Kastelan-Kunst K., Kunst B. // J. Membr. Sci. 2000. V. 168. P. 101.
94. Bera D., Chatterjee R., Banerjee S. // E-Polym. 2021. V. 21. № 1. P. 108.
95. Zhou X., Zhang Y., Huo G., Zhang Z., Xin J., Kang S., Wang Z., Li N. // J. Membr. Sci. 2023. V. 687. P. 122042.
96. Hu C.C., Wang Y.C., Li C.L., Lee K.R., Chen Y.C., Lai J.Y. // Desalination. 2002. V. 144. № 1-3. P. 103.
97. Bera D., Bandyopadhyay P., Ghosh S., Banerjee S. // J. Membr. Sci. 2014. V. 453. P. 175.

98. *Bera D., Bandyopadhyay P., Ghosh S., Banerjee S., Padmanabhan V.* // *J. Membr. Sci.* 2015. V. 474. P. 20.
99. *Plaza-Lozano D., Comesaña-Gándara B., Viuda M., Seong J.G., Palacio L., Prádanos P., de la Campa J.G., Cuadrado P., Lee Y.M., Hernández A., Alvarez C., Lozano A.E.* // *Mater. Today Commun.* 2015. V. 5. P. 23.
100. *Bisoi S., Mandal A.K., Venkat Padmanabhan V., Banerjee S.* // *J. Membr. Sci.* 2017. V. 522. P. 77.
101. *White H.D., Li C., Lively R.P.* // *Ind. Eng. Chem. Res.* 2022. V. 61. № 15. P. 5314.
102. *O’Harrar K.E., Kammakakam I., Noll D.M., Turflinger E.M., Dennis G.P., Jackson E.M., Bara J.E.* // *Membranes*. 2020. V. 10. P. 51.
103. *Chang K.S., Huang Y.H., Lee K.R., Tung K.L.* // *J. Membr. Sci.* 2010. V. 354. № 1-2. P. 93.
104. *Fan S.C., Li C.L., Wang Y.C., Lee K.R., Liaw D.J., Lai J.Y.* // *Desal.* 2002. V. 148. № 1-3. P. 43.
105. *Teng M.Y., Lee K.R., Fan S.C., Liaw D.J., Huang J., Lai J.Y.* // *J. Membr. Sci.* 2000. V. 164. № 1-2. P. 241.
106. *Teng M.Y., Lee K.R., Liaw D.J., Lin Y.S., Lai J.Y.* // *Eur. Polym. J.* 2000. V. 36. № 4. P. 663.
107. *Lee K.R., Wang Y.H., Teng M.Y., Liaw D.J., Lai J.Y.* // *Eur. Polym. J.* 1999. V. 35. № 5. P. 861.
108. *Shao S., Zeng F., Long L., Zhu X., Peng L.E., Wang F., Yang Z., Tang C.Y.* // *Environ. Sci. Technol.* 2022. V. 56 (18). P. 12811.
109. *Fan K., Liu Y., Wang X., Cheng P., Xia S.* // *Sep. Purif. Technol.* 2022. V. 297. № 121579.
110. *Heiranian M., Fan H., Wang L., Lu X., Elimelech M.* // *Chem. Soc. Rev.* 2023. V. 52. P. 8455.
111. *Hu M., Hu L., You M., Meng J.* // *Polymer*. 2023. V. 283. P. 126263.
112. *Shahriar Habib S., Weinman S.T.* // *Desal.* 2021. V. 502. P. 114939.
113. *Riley R.L., Lonsdale H.K., Lyons C.R., Merten U.* // *J. Appl. Polymer Sci.* 1967. V. 11. № 11. P. 2143.
114. *Lonsdale H.K.* // *J. Membr. Sci.* 1987. V. 33. № 2. P. 121.
115. *Lai G.S., Lau W.J., Gray S.R., Matsuura T., Jamshidi Gohari R., Subramanian M.N., Lai S.O., Ong C.S., Ismail A.F., Emazadahac D., Ghanbaria M.* // *J. Mater. Chem. A*. 2016. V. 4(11). P. 4134.
116. *Дзюбенко В.Г., Дубяга В.П., Шишова И.И., Никитина И.А., Миронова Л.В.* Пат. РФ. № 2492916, заявл. 12.03.2012; опубл. 20.09.2013.
117. *Hu D., Xu Z.L., Chen C.* // *Desalination*. 2012. V. 301. P. 75.
118. *Shen J.N., Yu C.C., Ruan H.M., Gao C.J., Van der Bruggen B.* // *J. Membr. Sci.* 2013. V. 442. P. 18.
119. *Wu H., Tang B., Wu P.* // *J. Membr. Sci.* 2013. V. 428. P. 341.
120. *Ong C.S., Lau W.J., Ismail A.F.* // *Desalin. Water Treat.* 2012. V. 50. P. 245.
121. *Wang L., Lin Y., Tang Y., Ren D., Wang X.* // *J. Membr. Sci.* 2021. V. 634. P. 119405.
122. *Shen H., Wang S., Xu H., Zhou Y., Gao C.* // *J. Membr. Sci.* 2018. V. 565. P. 145.
123. *Akther N., Lin Y., Wang S., Phuntsho S., Fu Q., Ghafour N., Matsuyama H., Shon H.K.* // *J. Membr. Sci.* 2021. V. 620. № 118876.
124. *Zhao H., Qiu S., Wu L., Zhang L., Chen H., Gao C.* // *J. Membr. Sci.* 2014. V. 450. P. 249.
125. *Namvar-Mahboub M., Pakizeh M., Davari S.* // *J. Membr. Sci.* 2014. V. 459. P. 22.
126. *Yin J., Yang Y., Hu Z., Deng B.* // *J. Membr. Sci.* 2013. V. 441. P. 73.
127. *Li Y., Wong E., Mai Z., Van der Bruggen B.* // *J. Membr. Sci.* 2019. V. 592. P. 117396.
128. *Zhao Y., Li X., Shen J., Gao C., Van der Bruggen B.* // *J. Mater. Chem. A*. 2020. V. 8. № 16. P. 4578.
129. *Guan C., Li Z., Zhu L., Xia D.* // *Sep. Purif. Technol.* 2021. V. 269. P. 118715.
130. *Guan C., Yang L., Zhu L., Xia D.* // *J. Clean. Prod.* 2022. V. 361. P. 132259.
131. *Blanca S., Pascual B.S., Miriam Trigo-López M., Ruiz J.A.R., Pablos J.L., Bertolín J.C., Represa C., Cuevas J.V., García F.C., García J.M.* // *Eur. Polym. J.* 2019. V. 116. P. 91.
132. *Chen M., Shen S., Zhang F., Zhang C., Xiong J.* // *Polymers*. 2022. V. 14. № 21. P. 4689.
133. *Molina S., Carretero P., Teli S.B., de la Campa J.G., Lozano A.E., de Abajo J.* // *J. Membr. Sci.* 2014. V. 454. P. 233.
134. *Fan Y., Li Z., Wei J.* // *Polymers*. 2021. V. 13. № 18. P. 3071.
135. *Yuan Y., Li J., Liu Y., Chen T., Lin J.* // *Polym. Compos.* 2018. V. 39. № 7. P. 2411.
136. *Yu J., Kim Y.G., Kim D.Y., Lee S., Joh H.I., Jo S.M.* // *Macromol. Res.* 2015. V. 23. P. 601.
137. *Nie C., Yang Y., Peng Z., Cheng C., Ma L., Zhao C.* // *J. Membr. Sci.* 2017. V. 528. P. 251.
138. *Федотов Ю.А., Ильин М.И., Гитис С.С., Субботин В.А., Валгин С.В.* // Высокомол. соединения. 1995. Т. 37. № 11. С. 1929.
139. *Бильдюкович А.В.* // Полимерные материалы и технологии. 2017. Т. 3. № 4. С. 6.
140. *Gao Y., Saenz de Jubera A.M., Marinas B.J., Moore J.S.* // *Adv. Funct. Mater.* 2013. V. 23. P. 598.
141. *Chen B., Chen D., Zhao X.* // *Sep. Purif. Technol.* 2020. V. 252. P. 117378.
142. *Hu Y., Lu J., He C., Wang W., Wang D.* // *Mater. Today Commun.* 2023. V. 35. P. 105674.
143. *Гитис С.С., Атрощенко Ю.М., Шахкельдян И.В., Градов В.А., Субботин В.А., Федотов Ю.А., Курин Ю.Э., Тимашов С.Ф.* Пат. РФ. № 92008969, заявл. 27.11.1992; опубл. 27.12.1995.

144. *Атрощенко Ю.М., Шахжельян И.В., Гитис С.С., Субботин В.А., Федотов Ю.А., Зотова Н.И.* Пат. РФ. № 2119910, заявл. 27.11.1992; опубл. 10.10.1998.
145. *Волков В.И., Маринин А.А.* // Успехи химии. 2013. Т. 82 (3). С. 248.
146. *Тверской В.А., Федотов Ю.А., Вдовин П.А., Дубяга В.П.* // Мембранны. 2007. № 4 (36). С. 17.
147. *Kirsh Yu.E., Vdovin P.A., Fedotov Yu.A., Platonov K.N., Smirnova N.N., Zemlyanova O.Yu., Timashev S.F.* // Polym. Sci. Ser. B. 1997. V. 39. № 5-6. P. 189.
148. *Смирнова Н.Н., Каталевский А.Д., Смирнов К.В.* // Журн. прикл. химии. 2022. Т. 95. № 10. С. 1293.
149. *Смирнова Н.Н., Кутровская С.В.* // Журн. прикл. химии. 2016. Т. 89. № 2. С. 265

## Polyamides in Membrane Technology

**A. D. Katalevsky<sup>1</sup>, V. A. Mayatsky<sup>2</sup>, N. N. Smirnova<sup>1,\*</sup>**

<sup>1</sup>*Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletov,  
ul. Gorkogo, 87, Vladimir, 600000, Russia*

<sup>2</sup>*LLC „Uniplast“, 77, B.Nizhegorodskaya str., Vladimir, 600016, Russia*

*\*e-mail: smirnovann@list.ru*

The issues of synthesis, structure and application of aromatic polyamides are considered. Unique thermal, physical-mechanical and chemical properties of these polymers have opened up possibilities of their use as functional and ultramodern materials. The variety of tools used in the creation and modification of aromatic polyamides makes it possible to „customize“ their properties for specific tasks, which makes aromatic polyamides truly universal for various industries, including membrane technologies.

**Keywords:** aromatic polyamides, synthesis, structure, applications, membranes