

ПОЛИКОНДЕНСАЦИЯ

УДК 541.64:547.58

СОПОЛИАРИЛЕНФТАЛИДЫ ДИФЕНИЛОКСИДНОГО РЯДА
С РАЗНЫМ СООТНОШЕНИЕМ ФТАЛИДНЫХ
И ДИФТАЛИДНЫХ ГРУПП

© 2021 г. Т. А. Янгиров^а, Б. М. Абдуллин^а, А. А. Фатыхов^а, Е. М. Захарова^{а,б},
С. Н. Салазкин^с, В. А. Крайкин^{а,*}

^а Уфимский институт химии Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук
450054 Уфа, пр. Октября, 69, Россия

^б Башкирский государственный университет
450076 Уфа, ул. Заки Валиди, 32, Россия

^с Институт элементоорганических соединений им. А.Н. Несмеянова Российской академии наук
119991 Москва, ул. Вавилова, 28, Россия

*e-mail: kraikin@anrb.ru

Поступила в редакцию 04.03.2020 г.

После доработки 17.07.2020 г.

Принята к публикации 27.08.2020 г.

Интербисополиконденсацией 3,3'-бис-(4-феноксифенил)-3,3'-дифталида и дифенилоксида с интермономером – псевдодихлорангидридом 4,4'-бис-(2-карбоксібензоил)дифенилоксида, протекающей по механизму электрофильного замещения Фриделя–Крафтса, синтезирован ряд новых сополиариленфталидов дифенилоксидного ряда с различным соотношением фталидных и дифталидных групп в полимерной цепи. Показано, что соотношение дифталидных (мезо- и рацемических) и обычных фталидных групп в основной цепи существенно влияет на морфологическую структуру сополимеров. Обнаружена побочная реакция “перифталидирования”, заключающаяся в каталитическом расщеплении дифталидной группы с образованием двух фталоильных карбокатионов, которые наряду с интермономером взаимодействуют с дифенилоксидом, участвуя в полимеробразующей реакции.

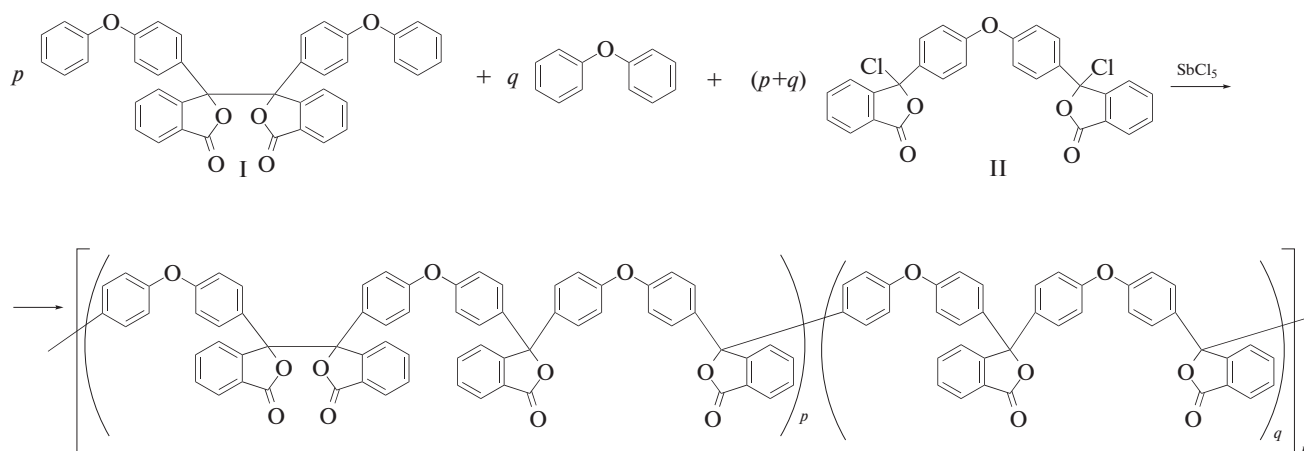
DOI: 10.31857/S2308113921010083

ВВЕДЕНИЕ

Один из широко применяемых подходов к созданию полимерных материалов с заданными характеристиками основан на синтезе статистических сополимеров, свойства которых можно регулировать, меняя мольные соотношения исходных мономеров. При поликонденсационном способе синтеза сополимеров наиболее часто используют реакцию интербисополиконденсации [1] двух (или более) сомономеров, не вступающих в реакцию между собой, но реагирующих с интермономером. По такой схеме осуществлен синтез и изучены структурные, термические, механические, оптические и некоторые другие характеристики широкого круга статистических полигетероариленов: сополиариленкетонатов [2], ароматических сополикарбонатов (в смесях с полистиролом) [3], сополиамидов [4], сополиариленэфирнитрилов [5], сополиариленэфирсульфонов [5–10].

Среди других классов полигетероариленов значительное место занимают полиариленфталиды (ПАФ), в которых высокие тепло-, термо- и хемостойкость, а также механическая прочность и необычные электрофизические свойства [11–20] сочетаются с хорошей растворимостью в широком круге органических растворителей. Сополиариленфталиды (как и все ПАФ вообще), обладающие в субмикронных пленках металлической и полупроводниковой проводимостью, были использованы для модификации поверхности электродов в системе химического распознавания “электронный язык”, где проявили различную склонность к адсорбции лекарственных аналитов [21–23].

Реакция электрофильного замещения Фриделя–Крафтса, которую применяют для получения ПАФ поликонденсацией мономеров с разнотипными взаимодействующими (псевдомонохло-



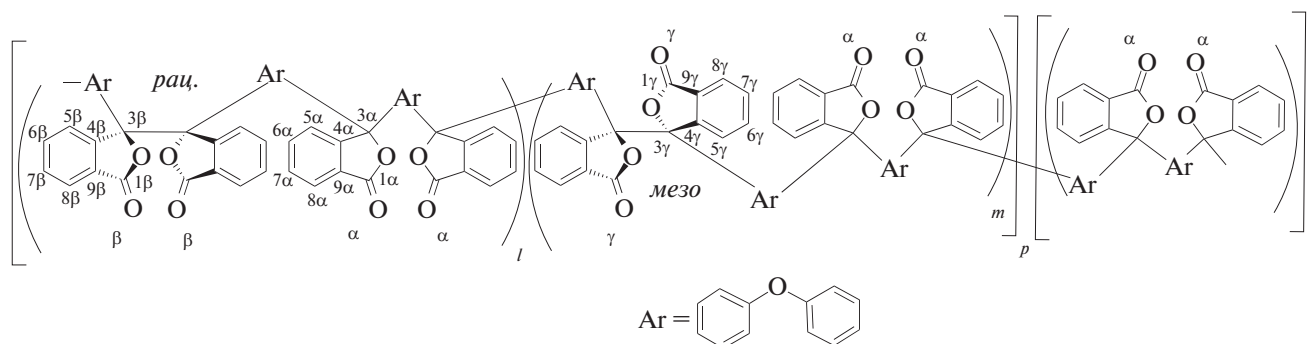
ПАΦ-1–ПАΦ-12

Состав и молекулярно-массовые характеристики образцов ПАΦ приведены в табл. 1.

Пробный синтез регулярно-чередующегося сополимера ПАΦ-1 ($p:q = 1:0$) показал, что при 100°C образуется около 50% нерастворимой гель-фракции. Понижение температуры до 90°C и ниже (80 и 70°C) привело к образованию полностью растворимых образцов, растворы которых из-за присутствия частиц микрогеля опалесцировали. В наименьшей степени опалесценция характерна для образцов, синтезированных при 70°C с использованием дихлорангидрида, полученного по способу 2. При прибавлении к 2–4%-ным растворам таких полимеров в хлороформе этилового спирта в количестве 10% от объема раствора ча-

стицы микрогеля начинают коагулировать, и в течение 1 суток выпадают в осадок. Содержание микрогеля, который может быть отделен фильтрованием через мембранный фильтр, в сополимерах, полученных при этой температуре, не превышает 1–2%. В образцах, синтезированных с применением дихлорангидрида, полученного по способу 1, отделить микрогель не удалось.

По данным ЯМР ^{13}C , макромолекулы синтезированных сополимеров построены из двух типов звеньев: p -звеньев, содержащих одиночные (α) и смежные фталидные группы, либо рацемической (β), либо *мезо*- (γ) конфигурации и q -звеньев, содержащих только α -фталидные группы.



На рис. 1 приведены фрагменты спектров низкомолекулярных модельных соединений и полимеров, содержащих сигналы sp^3 -гибридизированных атомов углерода C^3 во фталидных группах всех трех типов (α , β и γ). В спектрах рацемического и *мезо*-диастереоизомеров 3,3'-*бис*-(4-феноксифенил)-3,3'-дифталида и полиарилендифталида (ПАДФ-1) [30] данные атомы резонируют, соответственно, при $\delta_{\text{C}} = 90.6$ (3β) и 90.0 (3γ) м.д. (рис. 1).

В спектре полимера ПАΦ-12, содержащего в основной цепи только α -фталидные группы, в наблюдаемой области содержится единственный сигнал при $\delta_{\text{C}} = 91.0$ м.д. (3α). В случае ПАΦ-1–ПАΦ-11, имеющих все типы фталидных групп, регистрируются три сигнала.

Сопоставление интенсивностей рассмотренных выше сигналов показало, что состав образующихся сополимеров не соответствует составу исходной мономерной смеси: в сополимерах содержание β - и γ -фталидных групп всегда ниже, а

Таблица 1. Условия получения и характеристики полимеров ПАФ-1–ПАФ-12

Полимер	$p : q$	Температура синтеза, °С	$M_w \times 10^{-3}$	\bar{D}	Свойства пленок	
					σ_p , МПа	ε_p , %
Синтез на основе дихлорангидрида, полученного по способу 2						
ПАФ-1	1 : 0	70	34.8	3.7	30.8	1.19
ПАФ-2	10 : 1	70	70.7	3.9	63.5	2.19
ПАФ-3	4 : 1	70	30.0	3.4	33.4	1.18
ПАФ-4	2 : 1	70	72.8	3.1	35.5	1.22
ПАФ-5	1 : 1	70	99.3	3.6	46.7	1.51
ПАФ-6	1 : 2	70	33.6	2.4	51.5	1.69
ПАФ-7	1 : 4	70	26.8	2.2	64.7	2.47
ПАФ-8	1 : 7	70	84.2	6.3	87.1	4.83
ПАФ-9	1 : 10	70	33.9	3.6	90.9	4.05
ПАФ-10	1 : 15	70	17.4	2.2	27.3	0.73
ПАФ-11	1 : 20	70	13.1	2.3	75.2	5.96
ПАФ-12	0 : 1	70	25.7	2.9	73.5	4.01
Синтез на основе дихлорангидрида, полученного по способу 1						
ПАФ-1	1 : 0	80	27.6	2.5	Хрупкая	
ПАФ-2	10 : 1	90	50.0	2.8	Хрупкая	
ПАФ-3	4 : 1	90	20.0	1.8	Хрупкая	
ПАФ-4	2 : 1	90	7.7	1.9	Хрупкая	
ПАФ-5	1 : 1	90	30.0	2.3	Хрупкая	
ПАФ-6	1 : 2	90	11.4	3.2	Хрупкая	
ПАФ-7	1 : 4	90	26.0	2.4	Хрупкая	
ПАФ-8	1 : 7	70	26.8	2.7	80.9	4.08
ПАФ-8	1 : 7	80	80.0	2.9	75.5	5.05
ПАФ-9	1 : 10	70	22.1	2.4	87.1	4.20
ПАФ-9	1 : 10	90	52.0	6.0	73.3	4.47
ПАФ-10	1 : 15	70	22.2	2.6	47.4	1.95
ПАФ-11	1 : 20	70	16.2	2.3	26.2	1.15
ПАФ-11	1 : 20	80	75.0	3.6	70.9	3.86
ПАФ-12	0 : 1	90	40.0	5.7	16.9	1.11

α -фталидных групп – выше (рис. 2). Отношение величины $\alpha/(\beta + \gamma)$ в сополимерах, синтезированных при 70°C, к величине $\alpha/(\beta + \gamma)$ в мономерных смесях не зависит от соотношения q/p и составляет ~ 1.5 . При повышении температуры синтеза отклонение состава сополимеров в сторону преобладания α -фталидных групп становится еще более выраженным (рис. 3).

Было сделано предположение о протекании побочной реакции “перефталидирования”, заключающейся в каталитическом расщеплении дифталидной группы с образованием двух фталонильных карбокатионов, которые наряду с интермономером взаимодействуют с дифенилоксидом, т.е. участвуют в полимеробразующей реакции.

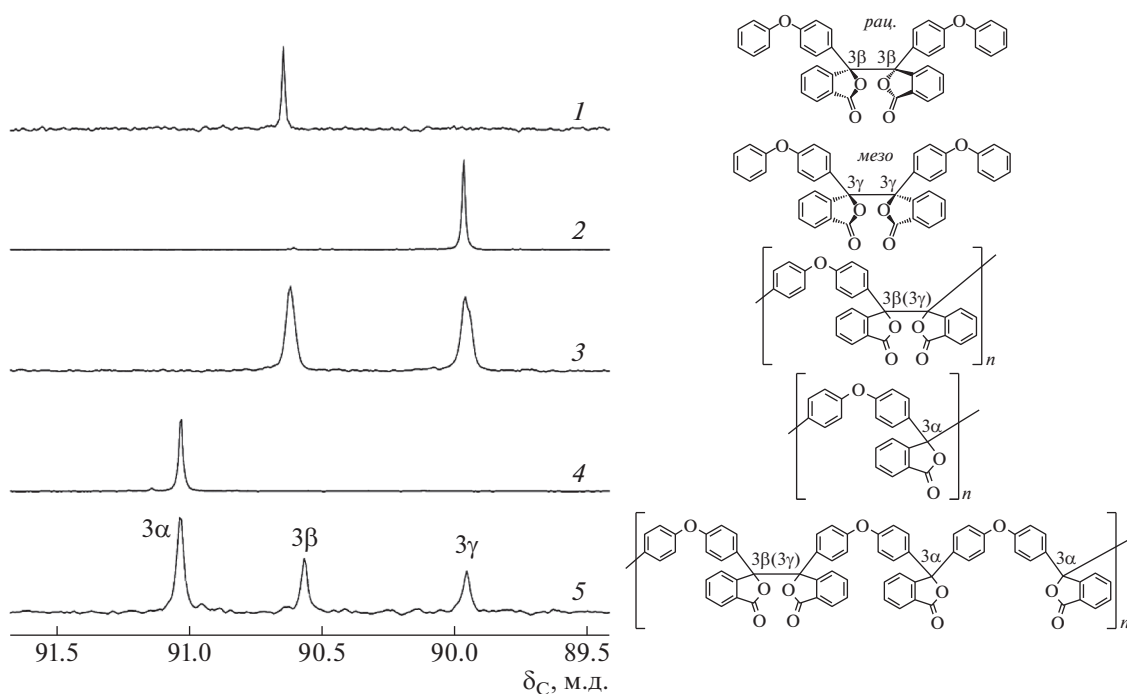
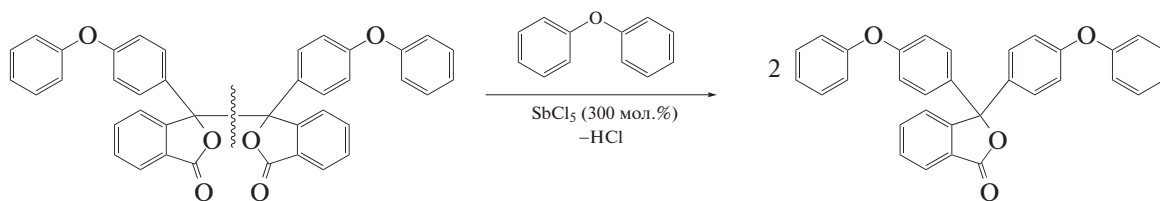


Рис. 1. Сигналы атомов C^3 фталидных групп рацемического (1) и мезо- (2) 3,3'-бис-(4-феноксифенил)-3,3'-дифталида, а также полимеров ПАДФ-1 (3), ПАФ-12 (4) и ПАФ-1 (5).

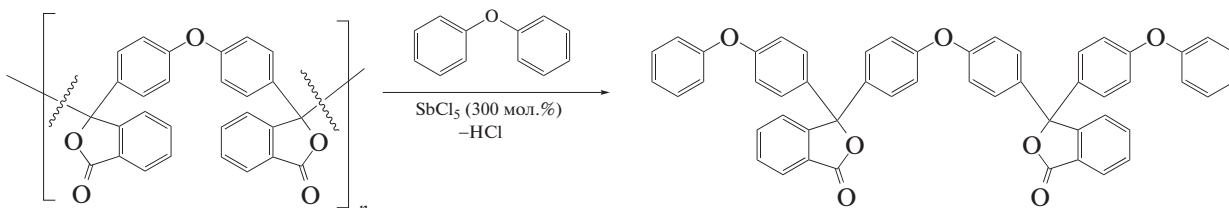
Для проверки данного предположения была изучена модельная реакция 3,3'-бис-(4-феноксифенил)-3,3'-дифталида с дифенилоксидом в присутствии $SbCl_5$. Было обнаружено, что при $90^\circ C$ 3,3'-бис-(4-феноксифенил)-3,3'-дифталид в при-

сутствии 300 мол. % пятихлористой сурьмы (по отношению к дифталиду) количественно реагирует с избытком дифенилоксида с образованием двух эквивалентов 3,3-ди-(4-феноксифенил)фталида:



В аналогичных условиях расщепление связи $C3(sp^3)-C3'(sp^3)$ происходит и в полиариленид-

фталиде ПАДФ-1, предположительно по следующей схеме:



Эта реакция, не изученная ранее, будет предметом наших дальнейших исследований.

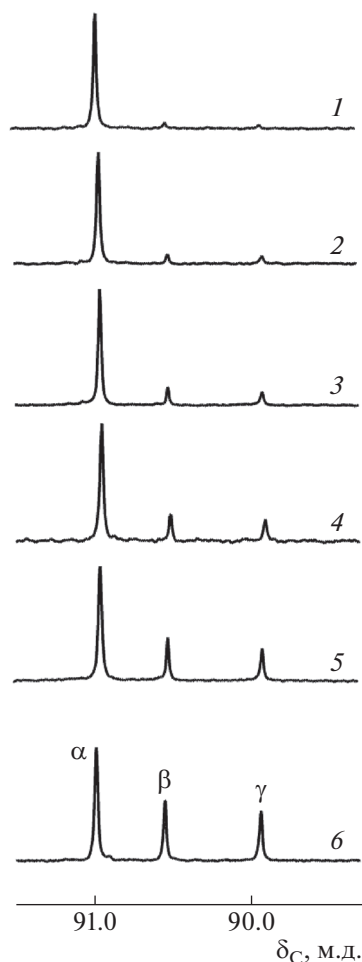


Рис. 2. Сигналы C^{13} -атомов α -, β - и γ -фталидных групп сополимеров при $p : q = 1 : 7$ (1), $1 : 4$ (2), $1 : 2$ (3), $1 : 1$ (4), $1 : 0.5$ (5) и $1 : 0$ (6).

Свойства сополиариленфталидов

Все синтезированные сополимеры растворимы в хлороформе, хлористом метиле, дихлорэтане, тетрагидрофуране, хлорбензоле, ТГФ, N-метилпирролидоне, ДМФА, 1,4-диоксане, пиридине, циклогексаноне, бензиловом спирте, бензонитриле; набухают в бензоле, толуоле, ксилоле, ацетоне, ДМСО; не растворимы в уксусной кислоте, четыреххлористом углероде, ацетонитриле, этилацетате.

Состав заметно влияет на морфологию высших сополиариленфталидов. Сополимеры с преобладанием склонных к кристаллизации хиральных и мезо-дифталидных групп имеют пленочную морфологическую структуру (рис. 4а), а с преобладанием одиночных фталидных групп — волокнистую структуру, характерную для аморфных полиариленфталидов (рис. 4б).

Закономерности в изменении физико-механических характеристик изученных сополиари-

ленфталидов не обнаружены, что можно объяснить одновременным влиянием на эти характеристики не только состава сополимеров, но также их молекулярной массы и микроструктуры, которые изменяются с изменением соотношения $q : p$ сложным образом. Сополимеры, синтезированные при 70°C , образуют пленки с прочностью на разрыв $\sigma_p = 26.2\text{--}90.9$ МПа и относительным удлинением $\epsilon_p = 1.15\text{--}5.96\%$ (табл. 1). Образцы, полученные при 90°C и соотношении $q : p \leq 4$, образуют хрупкие пленки. По всей видимости, повышение температуры синтеза приводит к увеличению доли реакции перефталидирования, которая может протекать и с образованием разветвленных структур. Ранее было показано, что формирование разветвленных структур при поликонденсации мономеров дифенилоксидного ряда происходит вследствие атаки активной концевой хлорангидридной группы на атом кислорода в основной цепи полимера с последующим появлением новых активных групп, взаимодействие которых с ароматическими фрагментами приводит к сшивке макромолекул и образованию гелевой фазы [36].

Другой причиной хрупкого разрушения пленок, полученных из мономерных смесей с $q : p \leq 4$, может являться высокое содержание в макромолекулах сополимеров двух смежных фталидных групп, связанных между собой простой связью, вращение вокруг которой стерически затруднено из-за сильного отталкивания электроотрицательных атомов кислорода [34]. Введение в полимерную цепь протяженных фрагментов с одиночными фталидными группами, соединенными с основной цепью связью $C(sp^2)\text{--}C(sp^3)$ с низким потенциальным барьером вращения, способствует разворачиванию полимерных цепей. Сополимеры с преобладанием одиночных фталидных групп и при температуре синтеза 90°C образуют прочные пленки.

По данным динамического ТГА (табл. 2), наименьшую термостойкость ($T_{н.р.} = 340^\circ\text{C}$ в инертной среде и 290°C на воздухе) в ряду исследованных полимеров имеет ПАДФ-1, содержащий в полимерной цепи только дифталидные группы, а наибольшую — ПАФ-12 ($T_{н.р.} = 460^\circ\text{C}$ в инертной среде и 430°C на воздухе). При уменьшении содержания дифталидных групп и увеличении содержания одиночных фталидных групп наблюдается монотонное возрастание температур начала разложения сополимеров как в инертной среде, так и на воздухе. В инертной среде потеря массы на первой ступени разложения (декарбоксилирование лактонных циклов дифталидных групп) понижается от 5 до 0.5% по мере уменьшения удельного содержания дифталидных групп в сополимерах.

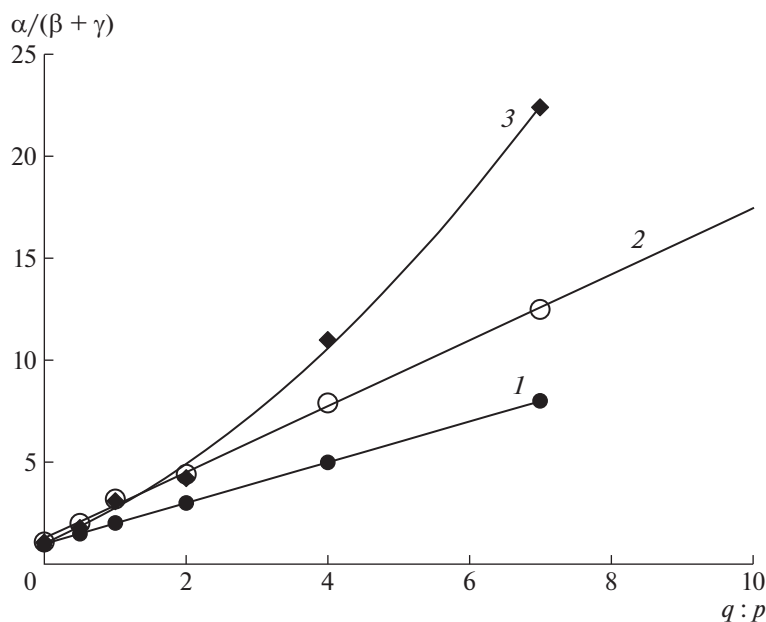


Рис. 3. Зависимость величины $\alpha/(\beta + \gamma)$ от отношения $q : p$ в мономерных смесях (1) и соответствующих сополиариленфталитах, полученных при 70°C (2) и при 90°C (3).

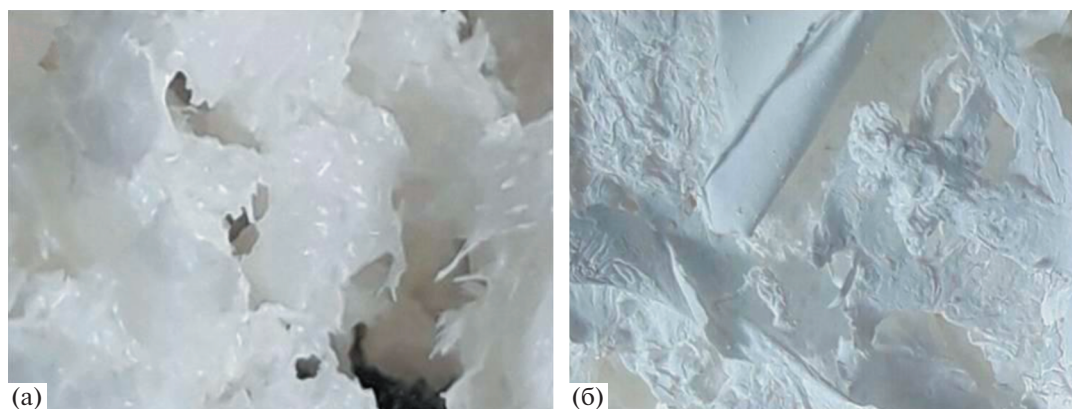


Рис. 4. Цифровые фотографии морфологической структуры сополиариленфталидов с $p : q = 4 : 1$ (а) и $1 : 15$ (б), высаженных в метанол из 5%-ного раствора в хлороформе.

Температура выгорания сополиариленфталидов при разложении на воздухе не имеет прямой зависимости от состава и изменяется в пределах 770–880°C. Термическое разложение сополимеров ПАФ-1–ПАФ-12 в инертной среде приводит к образованию коксового остатка, выход которого во всех случаях составляет ~58%.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Реактивы и материалы

Нитробензол квалификации “х. ч.” сушили и хранили над молекулярными ситами 4А, перед применением перегоняли при пониженном (10 мм рт. ст.) давлении. Дифенилоксид (“х. ч.”) перегоняли при пониженном (10 мм рт. ст.) давлении. В работе использовали нейлоновые мем-

бранные фильтры Supelco (диаметр 47 мм, поры 0.45 мкм).

Синтез мономеров и сополимеров

Псевдохлорангидрид 4,4'-бис-(2-карбокситензоил)дифенилоксида (II) получали двумя способами.

Способ 1. В одностороннюю колбу загружали 10 г 4,4'-бис-(2-карбокситензоил)дифенилоксида (0.02 моля), добавляли 20 мл хлористого тионила и кипятили в течение 12 ч. Избыток тионилхлорида отгоняли сначала при атмосферном, затем при пониженном (10 мм рт. ст.) давлении. Окончательную осушку дихлорангидрида осуществляли в вакууме при 90°C в течение 6 ч.

Таблица 2. Термические свойства сополимеров

Сополимер	Температура, °С	
	начала разложения*	выгорания
ПАДФ-1	340/290	820
ПАФ-1	350/300	780
ПАФ-2	350/300	770
ПАФ-3	370/350	850
ПАФ-4	390/350	870
ПАФ-5	400/360	830
ПАФ-6	410/410	880
ПАФ-7	430/430	830
ПАФ-8	440/430	790
ПАФ-9	450/430	820
ПАФ-10	450/430	850
ПАФ-11	450/430	780
ПАФ-12	460/430	780

* Определена по методу касательных; в числителе – в инертной атмосфере, в знаменателе – на воздухе.

Способ 2 аналогичен способу 1, но кипячение 4,4'-бис-(2-карбоксібенозил)дифенилоксида проводили в смеси хлористого тионила (10 мл) и дихлорэтана (10 мл).

Физико-химические константы дихлорангидрида соответствовали литературным данным [30].

Сополиариленфталиды ПАФ-1–ПАФ-12 синтезировали по следующей общей методике (в качестве примера описан синтез сополимера ПАФ-5). В подключенную к аргонной линии трехгорлую колбу, снабженную механической мешалкой и воздушным холодильником со счетчиком пузырьков, загружали 0.63565 г 3,3'-бис-(4-феноксифенил)-3,3'-дифталида (I) (1.055 ммоль), 0.17955 г дифенилоксида (1.055 ммоль), 1.06185 г дихлорангидрида (II) (2.110 ммоль) и 4.5 мл нитробензола. Реакционную смесь при перемешивании нагревали до 70–90°С и вносили 0.027 мл SbCl_5 (0.21 ммоль), после чего перемешивание продолжали при постоянном токе аргона в течение 12 ч (при 70°С), или 10 ч (при 90°С). По окончании синтеза в реакционную массу добавляли сначала 2 мл ДМФА, затем 15 мл хлороформа, перемешивали и выливали в 5-кратный избыток спирта. Высаженный полимер отфильтровывали, промывали спиртом и сушили при 100°С до постоянной массы.

Полимеры ПАФ-1–ПАФ-11.

ИК-спектры, cm^{-1} (пленка): 1776 (C=O), 1597, 1500, 1465, 1286, 1246, 1172, 1101, 1083, 1004, 994, 973, 930, 873, 833, 804, 756, 691.

Спектр ЯМР ^1H , δ_{H} , м.д. (CDCl_3): 6.74 (м, H^{Ar}), 6.84 (м, H^{Ar}), 6.93 (м, H^{Ar}), 7.27 (м, H^{Ar}), 7.35 (м,

$\text{H}^{7\beta}$), 7.45 (м, $\text{H}^{7\gamma}$), 7.55 (м, H^{Ar}), 7.62–7.75 (м, H^{Ar}), 7.93 (м, $\text{H}^{5\alpha, 5\beta}$), 8.30 (м, $\text{H}^{5\gamma}$).

Спектр ЯМР ^{13}C , δ_{C} , м.д.: 89.95 ($\text{C}^{3\gamma}$), 90.55 ($\text{C}^{3\beta}$), 91.03 ($\text{C}^{3\alpha}$), 118.23 (C^{Ar}), 118.45 (C^{Ar}), 118.58 (C^{Ar}), 118.76 (C^{Ar}), 123.98 ($\text{C}^{5\alpha}$), 124.19 ($\text{C}^{5\beta}$), 124.97 ($\text{C}^{5\gamma}$), 125.35 ($\text{C}^{8\alpha}$), 125.59 ($\text{C}^{8\gamma}$), 125.68 ($\text{C}^{8\beta}$), 125.80 ($\text{C}^{9\beta}$), 126.11 ($\text{C}^{9\alpha, 9\gamma}$), 128.21 (C^{Ar}), 128.51 (C^{Ar}), 128.64 (C^{Ar}), 128.69 (C^{Ar}), 128.73 (C^{Ar}), 128.79 (C^{Ar}), 129.52 ($\text{C}^{7\alpha}$), 129.88 ($\text{C}^{7\gamma}$), 129.94 ($\text{C}^{7\beta}$), 131.76 (C^{Ar}), 134.35 ($\text{C}^{6\alpha}$), 134.43 ($\text{C}^{6\gamma}$), 134.76 ($\text{C}^{6\beta}$), 135.70 (C^{Ar}), 135.84 (C^{Ar}), 148.55 ($\text{C}^{4\beta}$), 148.85 ($\text{C}^{4\gamma}$), 151.87 ($\text{C}^{4\alpha}$), 156.58 (C^{Ar}), 156.81 (C^{Ar}), 156.91 (C^{Ar}), 157.03 (C^{Ar}), 168.22 ($\text{C}^{1\gamma}$), 168.95 ($\text{C}^{1\beta}$), 169.54 ($\text{C}^{1\alpha}$).

Полимер ПАФ-12.

ИК-спектр, cm^{-1} (пленка): 1772 (C=O), 1597, 1500, 1465, 1286, 1245, 1171, 1101, 1084, 1014, 973, 929, 855, 756, 691.

Спектр ЯМР ^1H , δ_{H} , м.д.: 6.93 (м, 4H, H^{Ar}), 7.28 (м, 4H, H^{Ar}), 7.56 (м, 2H, $\text{H}^{6\alpha, 8\alpha}$), 7.70 (м, 1H, $\text{H}^{7\alpha}$), 7.93 (м, 1H, $\text{H}^{5\alpha}$).

Спектр ЯМР ^{13}C , δ_{C} , м.д.: 91.03 ($\text{C}^{3\alpha}$), 118.76 (C^{Ar}), 123.98 ($\text{C}^{5\alpha}$), 125.37 ($\text{C}^{8\alpha}$), 126.09 ($\text{C}^{9\alpha}$), 128.77 (C^{Ar}), 129.53 ($\text{C}^{7\alpha}$), 134.35 ($\text{C}^{6\alpha}$), 135.84 (C^{Ar}), 151.87 ($\text{C}^{4\alpha}$), 156.92 (C^{Ar}), 169.53 ($\text{C}^{1\alpha}$).

Модельная реакция расщепления

3,3'-бис-(4-феноксифенил)-3,3'-дифталида (I)

В трехгорлую колбу, снабженную механической мешалкой, воздушным холодильником со счетчиком пузырьков и подключенную к аргонной линии, загружали 0.54 г соединения I (0.9 ммоль), 4.6 г дифенилоксида (27 ммоль) и 8 мл нитробензола. Реакционную смесь при перемешивании нагревали до 90°С, вносили 0.345 мл SbCl_5 (2.7 ммоль) и продолжали перемешивать при данной температуре при постоянном токе аргона. После окончания выделения хлороводорода реакционную смесь выливали в воду и отгоняли избыток дифенилоксида и нитробензола с водяным паром. Остаток сушили на воздухе, растворяли в хлороформе и отфильтровывали через мембранный фильтр, фильтрат упаривали.

Аналогичным образом проводили расщепление полимера ПАДФ-1.

Температуры плавления и ЯМР-спектры полученных 3,3'-ди-(4-феноксифенил)фталида и 4,4'-бис-[3-(4-феноксифенил)-3-фталидил]дифенилоксида совпадали с приведенными в литературе [37].

Приборы и методы исследования

Спектры ЯМР ^1H и ЯМР ^{13}C регистрировали на спектрометре “BrukerAvance III” (“Bruker”, Германия) при 500 и 126 МГц соответственно, в CDCl_3 , внутренний стандарт – CHCl_3 . ИК-спектры записывали на приборе “Shimadzu IR Pres-

tige-21” (“Shimadzu”, Япония) в пленке. Молекулярную массу полимеров определяли методом гель-проникающей хроматографии с калибровкой по полистиролу на высокоэффективном жидкостном хроматографе “Shimadzu” (Япония), оснащенный тремя колонками, проточным дегазатором, дифференциальным рефрактометрическим и вискозиметрическим детекторами. Хроматографию проводили в ТГФ при 35°C и скорости потока 1 мл/мин. Термогравиметрический анализ выполняли на дериватографе “МOM Q-1000” (МOM, Венгрия) при скорости нагревания 5 град/мин на воздухе и в инертной среде. Пленки полимеров получали поливом их раствора в хлористом метиле на целлофановую подложку; после испарения растворителя пленки сушили в вакууме при повышении температуры от 60 до 80°C в течение 10 ч, затем при 120°C в течение 24 ч. Испытания по растяжению образцов пленок проводили на универсальной испытательной машине “SHIMADZU AGS-X” (“Shimadzu”, Япония). Ширина испытуемой части ~5.0 мм, толщина от ~0.046 мм. Расстояние между зажимами 50 мм, тип зажимов – тисочные, прорезиненные, скорость растяжения – 1 мм/мин.

Спектры ЯМР и ИК регистрировали на оборудовании Центра коллективного пользования “Химия” Уфимского института химии Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук.

Работа выполнена согласно Госзаданию (регистрационные номера АААА-А20-120012090020-7 и АААА-А20-120012090029-0).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Korshak V.V., Vinogradova S.V., Kuchanov S.I., Vasnev V.A. // J. Macromol. Sci., Polym. Rev. 1976. V. 14. № 1. P. 27.
- Attwood T.E., Dawson P.C., Freeman J.L., Hoy L.R.J., Rose J.B., Staniland P.A. // Polymer. 1981. V. 22. P. 1096.
- Penco M., Sartore L., Sciucca S.D., Landro L.D. // Int. J. Polym. Mater. 2006. V. 55. P. 1027.
- Valieva I.A., Goikhman M.Y., Podeshvo I.V., Loretsyan N.L., Gofman I.V., Smyslov R.Y., Litvinova L.S., Yakimansky A.V. // Polymer Science B. 2019. V. 61. № 3. P. 302.
- Hu W., You Y., Tong L., Tu L., Wang Y., Wei R., Liu X. // High. Perform. Polym. 2019. V. 31. № 6. P. 686.
- Pu Z., Zheng X., Xia J., Zhong J. // Polym. Int. 2020. V. 69. P. 604.
- Wang F., Hickner M., Kim Y.S., Zawodzinski T.A., McGrath J.E. // J. Membr. Sci. 2002. V. 197. P. 231.
- Oroujzadeh M., Mehdipour-Ataei S., Esfandeh M. // Eur. Polym. J. 2013. V. 49. № 6. P. 1673.
- Harrison W.L., Hickner M.A., Kim Y.S., McGrath J.E. // Fuel Cells. 2005. V. 5. № 2. P. 201.
- Wang S., He F., Weng Q., Yuan D., Chen P., Chen X., An Z. // RSC Adv. 2020. V. 10. P. 24772.
- Salazkin S.N., Shaposhnikova V.V., Machulenko L.N., Gileva N.G., Kraikin V.A., Lachinov A.N. // Polymer Science A. 2008. V. 50. № 3. P. 243.
- Lachinov A.N., Vorob'eva N.V. // Phys.-Uspekhi. 2006. V. 49. № 12. P. 1223.
- Vorob'eva N.V., Lachinov A.N. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2013. V. 77. № 10. P. 1238.
- Yusupov A.R., Rakhmееv R.G., Lachinov A.N., Kalimullina L.R., Nakaryakov A.S., Bunakov A.A. // Phys. Solid State. 2013. V. 55. № 7. P. 1494.
- Gadiev R.M., Lachinov A.N., Galiev A.F., Kalimullina L.R., Nabiullin I.R. // JETP Lett. 2014. V. 100. № 4. P. 251.
- Shalygina E.E., Kharlamova A.M., Makarova A.V., Kaminskaya T.P., Shalygin A.N. // Phys. Solid State. 2018. V. 60. № 9. P. 1737.
- Lezhnev S.K., Yusupov A.R., Galiev A.F., Kornilov V.M., Gadiev R.M., Lachinov A.N. // JETP Lett. 2019. V. 110. № 7. P. 447.
- Nabiullin I.R., Gadiev R.M., Lachinov A.N. // Phys. Solid State. 2019. V. 61. № 6. P. 1122.
- Yusupov A.R., Lachinov A.N., Kalimullina L.R., Gadiev R.M., Nikitina D.V. // Phys. Solid State. 2019. V. 61. № 3. P. 450.
- Salikhov R.B., Lachinov A.N., Rakhmееv R.G., Gadiev R.M., Yusupov A.R., Salazkin S.N. // Meas. Tech. 2009. V. 52. № 4. P. 427.
- Zil'berg R.A., Yarkaeva Yu.A., Maksyutova E.I., Sidel'nikov A.V., Maistrenko V.N. // J. Anal. Chem. 2017. V. 72. № 4. P. 402.
- Zil'berg R.A., Sidel'nikov A.V., Maistrenko V.N., Yarkaeva Yu.A., Khamitov E.M., Kornilov V.M., Maksutova E.I. // Electroanalysis. 2018. V. 30. № 4. P. 619.
- Zil'berga R.A., Maistrenko V.N., Yarkaeva Yu.A., Dubrovskii D.I. // J. Anal. Chem. 2019. V. 74. № 12. P. 1245.
- Salazkin S.N. // Polymer Science B. 2004. V. 46. № 7–8. P. 203.
- Vinogradova S.V., Vasnev V.A., Vygodskii Ya.S. // Russ. Chem. Rev. 1996. V. 65. № 3. P. 249.
- Vinogradova S.V., Vasnev V.A. // Russ. Chem. Rev. 2004. V. 73. № 5. P. 487.
- Sapozhnikov D.A., Vygodskii Ya.S. // Polymer Science B. 2015. V. 57. № 4. P. 275.
- Виноградова С.В., Васнев В.А. Поликонденсационные процессы и полимеры. М.: Наука, 2000.
- Бюллер К.-У. Тепло- и термостойкие полимеры / Пер. с нем. Н.В. Афанасьева, Г.М. Цейтлина. М.: Химия, 1984.
- Kraikin V.A., Yangirov T.A., Fatykhov A.A., Ivanova V.P., Sedova E.A., Gileva N.G., Ionova I.A. // High. Perform. Polym. 2017. V. 29. № 6. P. 677.
- Пат. 2631502 Россия. 2017.
- Пат. 2634729 Россия. 2017.
- Bhatt M.V., Kamath K.M., Ravindranathan M. // J. Chem. Soc. C. 1971. P. 3344.
- Yangirov T.A., Fatykhov A.A., Sedova E.A., Khalilov L.M., Meshcheryakova E.S., Ivanov S.P., Salazkin S.N., Kraikin V.A. // Tetrahedron. 2019. V. 75. № 9. P. 1282.
- Wolfe J.F., Stille J.K. // Macromolecules. 1976. V. 9. № 3. P. 489.
- Золотухин М.Г., Скурда В.Д., Сундуков В.И., Салазкин С.Н., Седова Э.А., Миндияров Х.Г., Рафиков С.Р. // Высокомолек. соед. Б. 1987. Т. 29. № 5. С. 378.
- Gileva N.G., Nosovskaya I.I., Fatykhov A.A., Salazkin S.N., Kraikin V.A. // Russ. J. Org. Chem. 2019. V. 55. № 2. P. 174.