

УДК 661.742.24;54-126

НЕСИММЕТРИЧНЫЕ МЕТАКРИЛАТСОДЕРЖАЩИЕ БЕНЗИЛИДЕНЦИКЛОПЕНТАНОНОВЫЕ КРАСИТЕЛИ В ОДНО- И ДВУХФОТОННОЙ ФОТОПОЛИМЕРИЗАЦИИ

© 2022 г. Э. Р. Жиганшина^{а, *}, М. В. Арсеньев^а, Д. А. Колымагин^б, М. А. Батенькин^а,
С. А. Чесноков^а, А. Г. Витухновский^б

^аФедеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлоорганической химии им. Г.А. Разуваева Российской академии наук, ул. Троицкая 49, Нижний Новгород, 603950 Россия

^бФедеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования “Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)”, Институтский пер. 9, Долгопрудный, 141700 Россия

*E-mail: zhiganshinae@mail.ru

Поступила в редакцию 23.04.2022 г.

После доработки 10.05.2022 г.

Принята к публикации 15.05.2022 г.

Синтезированы два новых фотоинициатора ряда α, α -бис(арилиден)циклопентанонов несимметричной структуры, содержащих по два метакрилатных фрагмента. Исследованы электрохимические и фотолюминесцентные свойства инициаторов. В присутствии инициаторов осуществлена фотополимеризация триакрилата пентаэритрита под действием излучения $\lambda = 365/405$ нм (однофотонный процесс) и сфокусированным излучением фемтосекундного лазера с длиной волны 780 нм (двухфотонный процесс). Для каждого инициатора определены “окна изготовления” и методом DLW-наноитографии изготовлены 3D-микроструктуры сложной архитектуры.

Ключевые слова: бензилиденциклопентанон, метакрилат, фотоинициатор, фотополимеризация, двухфотонная фотополимеризация

DOI: 10.31857/S0023119322050175

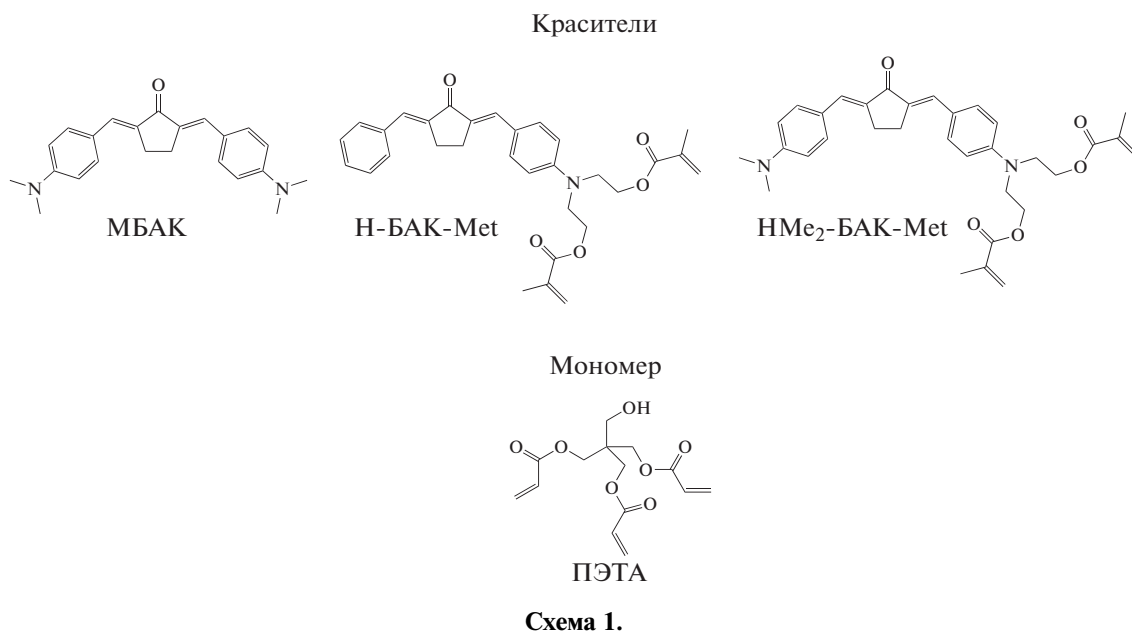
ВВЕДЕНИЕ

Широкое использование метода фотополимеризации в промышленности связано с тем, что он объединяет спектр экономических и экологических требований, среди которых возможность проведения высокоэнергетических процессов при температуре окружающей среды и без растворителя, временной и пространственный контроль над протеканием реакций [1, 2]. Фотоинициатор является одним из главных компонентов в фотополимеризующейся композиции (ФПК), который определяет спектральный диапазон иницирующего излучения, эффективность полимеризации и конечную конверсию мономера. В последнее время для снижения миграционных характеристик и увеличения реакционной способности фотоинициатора в его молекулу вводят полимеризационноспособные группы, получая фотоинициаторы-мономеры [3–5]. Перспективной областью использования фотополимеризации является двухфотонная 3D-наноитография, в частности метод прямого лазерного письма (Direct Laser Writing – DLW-

фотоитография) [6, 7]. Двухфотонный механизм фотоиницирования предполагает одновременное поглощение инициатором двух фотонов с образованием возбужденного состояния молекулы, идентичного по энергии возбужденному состоянию при однофотонном поглощении. Рабочая длина волны, например, Ti-сапфирового лазера, составляет ~800 нм, соответственно, максимум длины волны поглощения фотоинициатора должен находиться в области 400 нм. Бензилиденциклопентаноновые красители – известные фотоинициаторы одно- и двухфотонной фотополимеризации [8–10], чувствительные в видимом диапазоне спектра. Ранее были получены симметричные структуры метакрилатированных бисарилиденциклопентанонов, содержащих две акрилатные группы и четыре метакрилатные группы [11, 12]. В качестве фотоинициаторов они продемонстрировали низкие миграционные характеристики из конечных полимеров. С использованием ФПК на основе тетраметакрилата бисарилиденциклопентанона методом DLW-наноитографии получены

структуры с минимальной шириной линии 70 нм. В настоящей работе синтезированы новые несимметричные диметакрилатсодержащие красители ряда α,α -бис(арилиден)циклопентанонов. Исследована их реакционная способность в реакции фотоинициирования одно- и двухфотонной

фотополимеризации пентаэритритол триакрилата (ПЭТА). На примере одного из фотоинициаторов изготовлены микроструктуры методом DLW-наноитографии. Структурные формулы используемых в работе соединений и их обозначения приведены на схеме 1.



ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Реагенты: МБАК получен по методике [12]. Пентаэритритол триакрилат (ПЭТА) (“Aldrich”) использовали без дополнительной очистки. Растворители очищали по стандартной методике [13].

2-((E)-бензилиден)-5-((E)-4-(бис(2-гидроксиэтил)-амино)бензилиден)циклопентан-1-он (3a). К раствору 1.62 г (28 ммоль) КОН в 20 мл смеси MeOH–H₂O добавляли 2.39 г (5.8 ммоль) альдегида **1** (синтезирован по методике [12]) и 1 г (5.8 ммоль) соединения **2a** (синтезирован по методике [14]). Реакционную смесь перемешивали 2 ч, метанол упаривали, красно-коричневый осадок отфильтровывали, промывали большим количеством воды и сушили в вакуумном шкафу. Выход: 1.52 г (72%). *T*_{пл} = 143–145°C. ¹H ЯМР (300 МГц, ДМСО-*d*₆, δ , м.д.): 3.04 (м, 4H, CH₂ (циклопентанон)), 3.48 (т, 4H, CH₂, J = 5.3 Гц), 3.55 (т, 4H, CH₂, J = 5.3 Гц), 4.72–4.84 (широкий с, 2H, OH), 6.80 (д, 2H, C_{анил}, J = 9.0 Гц), 7.21 (м, 3H, C_{арил}), 7.35 (с, 2H, CH), 7.46 (д, 2H, C_{анил}, J = 9.0 Гц), 7.51 (м, 2H, C_{арил}). ¹³C ЯМР (75 МГц, ДМСО-*d*₆, δ , м.д.): 26.54, 53.59, 58.60, 112.08, 129.17, 129.32, 129.54, 130.88, 131.27, 133.35, 134.60, 136.17, 139.26, 149.84, 194.95. ИК (вазелиновое масло, ν /см⁻¹): 1370, 1517, 1582, 1680, 2920, 3400.

((4-((E)-(3-((E)-бензилиден)-2-оксоциклопентил-ден)метил)фенил)азандиил)бис(этан-2,1-дил) бис(2-метакрилат) (H-БАК-Met). К суспензии соединения **3a** (1 г, 2.7 ммоль) в дихлорметане (20 мл) добавляли NEt₃ (0.72 мл, 5.4 ммоль) и метакрилоилхлорид (0.52 мл, 5.4 ммоль). Смесь перемешивали в течение 24 ч при комнатной температуре, промывали водой. Экстракт сушили Na₂SO₄ и фильтровали. К раствору в дихлорметане добавляли гексан (30 мл) и продукт кристаллизовали, фильтровали и сушили при температуре окружающей среды. Диметакрилат **H-БАК-Met** был выделен в виде красных кристаллов. Выход: 0.66 г (60%). *T*_{пл} = 94–96°C. ¹H ЯМР (300 МГц, CDCl₃, δ , м.д.): 1.91 (с, 6H, CH₃(мет)), 3.04 (м, 4H, CH₂ (циклопентанон)), 3.71 (т, 4H, NCH₂, J = 7.2 Гц), 4.32 (т, 4H, OCH₂, J = 7.2 Гц), 5.54 (с, 2H, C_{мет}H), 6.06 (с, 2H, C_{мет}H), 6.81 (д, 2H, C_{анил}, J = 9.0 Гц), 7.24 (м, 1H, C_{арил}), 7.34 (м, 2H, C_{арил}), 7.37 (с, 2H, CH), 7.51 (м, 2H, C_{анил}), 7.56 (м, 2H, C_{арил}). ¹³C ЯМР (75 МГц, CDCl₃, δ , м.д.): 18.25, 26.50, 50.12, 64.42, 111.86, 125.35, 127.48, 128.42, 128.64, 129.37, 129.61, 133.82, 134.09, 136.24, 136.33, 137.22, 150.63, 167.62, 167.65. ИК (вазелиновое масло, ν /см⁻¹): 1377, 1520, 1572, 1680, 1717, 2920.

2-((E)-4-(бис(2-гидроксиэтил)амино)бензилиден)-5-((E)-4-(диметиламино)бензилиден)циклопентан-1-он (36). К раствору 2 г (36 ммоль) КОН в 20 мл смеси MeOH-H₂O добавляли 1.94 г (4.6 ммоль) альдегида **1** и 1 г (4.6 ммоль) соединения **2b** (синтезирован по методике [15]). Реакционную смесь перемешивали 2 ч, метанол упаривали, красно-коричневый осадок отфильтровывали, промывали большим количеством воды и сушили в вакуумном шкафу. Выход: 1.24 г (50%). $T_{пл} = 155-157^{\circ}\text{C}$. Найдено (%): С 73.80; Н 7.39. ¹Н ЯМР (300 МГц, DMSO-*d*₆, δ, м.д.): 2.85 (м, 4Н, СН₂ (циклопентанон)), 2.98 (с, 6Н, NCH₃), 3.48 (т, 2Н, NCH₂, J = 9.8 Гц), 3.54 (т, 4Н, OCH₂, J = 9.8 Гц), 4.78 (т, 2Н, OH, J = 9.8 Гц), 6.73 (д, 2Н, C_{анилОН}, J = 8.0 Гц), 6.78 (д, 2Н, C_{анил}, J = 8.0 Гц), 7.27 (с, 2Н, СН), 7.49 (м, 2Н, C_{анил}), 7.50 (м, 2Н, C_{анилОН}). ¹³С ЯМР (75 МГц, DMSO-*d*₆, δ, м.д.): 26.53, 37.66, 53.59, 58.60, 112.02, 112.35, 127.28, 129.44, 129.56, 133.67, 136.37, 150.11, 151.45, 190.87. ИК (вазелиновое масло, ν/см⁻¹): 1376, 1450, 1523, 1586, 1688, 2923, 3400.

((4-((E)-3-((E)-4-(диметиламино)бензилиден)-2-оксоциклопентилен)метил)-фенил)азандиил)бис-(этан-2,1-диил) бис(2-метакрилат) (NMe₂-БАК-Met). К суспензии соединения **36** (1 г, 2.5 ммоль) в дихлорметане (20 мл) добавляли NEt₃ (0.75 мл, 5 ммоль) и метакрилоилхлорид (0.48 мл, 5 ммоль). Смесь перемешивали в течение 24 ч при комнатной температуре, промывали водой. Экстракт сушили Na₂SO₄ и фильтровали. К раствору в дихлорметане добавляли гексан (30 мл) и продукт кристаллизовали, фильтровали и сушили при температуре окружающей среды. Диметакрилат NMe₂-БАК-Met был выделен в виде красно-оранжевых кристаллов. Выход: 0.97 г (73%). $T_{пл} = 170-172^{\circ}\text{C}$. ¹Н ЯМР (300 МГц, CDCl₃, δ, м.д.): 1.93 (с, 6Н, CH₃(мет)), 3.04 (м, 4Н, CH₂ (циклопентанон)), 3.08 (с, 6Н, NCH₃), 3.74

(т, 4Н, NCH₂, J = 11.6 Гц), 4.35 (т, 4Н, OCH₂, J = 11.6 Гц), 5.58 (с, 2Н, C_{мет}Н), 6.09 (с, 2Н, C_{мет}Н), 6.65 (д, 2Н, C_{анилОН}, J = 8.0 Гц), 6.75 (д, 2Н, C_{анил}, J = 8.0 Гц), 7.51 (с, 2Н, СН), 7.54 (м, 2Н, C_{анил}), 7.56 (м, 2Н, C_{анилОН}). ¹³С ЯМР (75 МГц, CDCl₃, δ, м.д.): 18.33, 26.63, 49.44, 61.55, 111.06, 111.98, 125.40, 126.16, 129.16, 129.30, 132.56, 136.18, 136.31, 150.63, 151.71, 167.62, 191.80. ИК (вазелиновое масло, ν/см⁻¹): 1374, 1464, 1521, 1588, 1670, 1714, 2920.

Электрохимические исследования проводили согласно методике, описанной в [12].

Спектрофотометрические исследования красителей проводили согласно методике, описанной в [12]. Константы фотопревращения красителей (*k*, М⁻¹с⁻¹) определяли по тангенсу угла наклона прямой, построенной в графических координатах 1/С – *t*, где С (М) – концентрация красителя, *t* (мин) – время экспозиции. Исследования одно- и двухфотонной фотополимеризации красителей проводили согласно методикам, описанным в [12].

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Стартовым соединением для синтеза искомых красителей является альдегид **1**, полученный из *N*-фенилдиэтанолamina (схема 2). Несимметричные бисарилиденциклопентаноны **Н-БАК-Met** и **NMe₂-БАК-Met** были синтезированы в две стадии. На первой стадии получили диолы **3a** и **36** взаимодействием соединений **2a** и **2b** с эквивалентным количеством альдегида **1** в присутствии КОН в водно-спиртовой среде. Реакция с избытком хлорангидрида метакриловой кислоты (2.5 экв) в хлористом метиле в течение 24 ч приводит к образованию целевых диметакрилатов **Н-БАК-Met** и **NMe₂-БАК-Met** с выходами 60 и 73% соответственно. Все соединения выделены и охарактеризованы физико-химическими методами исследования (ЯМР, ИК, УФ спектроскопиями).

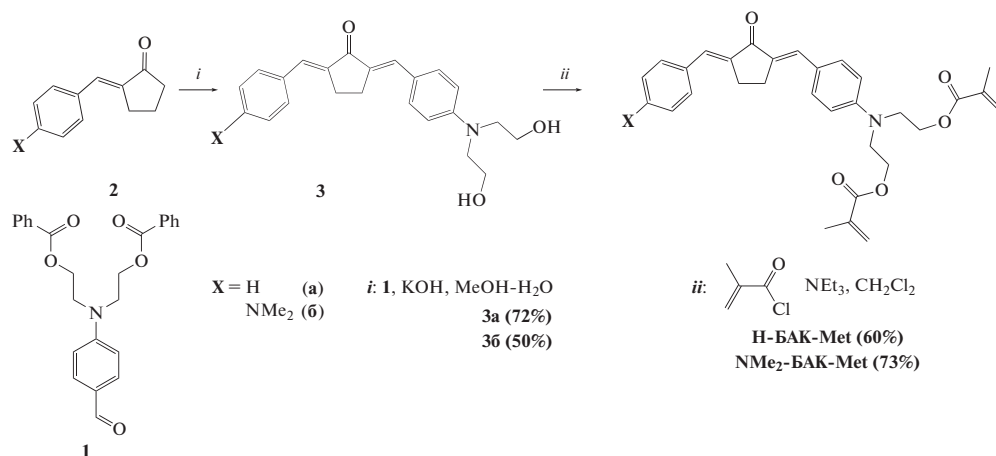


Схема 2.

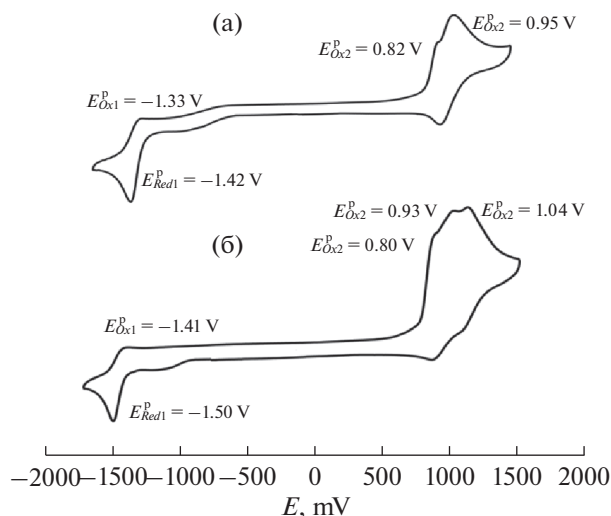


Рис. 1. Кривые ЦВА соединений **H-BAK-Met** (а) и **NMe₂-BAK-Met** (б). MeCN, Ag/AgCl/KCl(нас.), 0.1 М (NBu₄)ClO₄, скорость сканирования 200 мВ с⁻¹.

Дальнейшие исследования по фотохимии, одно- и двухфотонной фотополимеризации для инициаторов (красителей) **H-BAK-Met** и **NMe₂-BAK-Met** представлены в сравнении с известным в литературе инициатором **МБАК**. Методом цикловольтамперометрии (ЦВА) исследованы электрохимические свойства красителей в растворах ацетонитрила (MeCN). Вид кривых ЦВА соединений **H-BAK-Met** и **NMe₂-BAK-Met** имеют аналогичный соединению **МБАК** характер: наблюдается квазиобратимая волна восстановления в области -1.5–1.3 В (восстановление карбонильной группы) и две необратимые (в случае соединения **NMe₂-BAK-Met**

(рис. 1б) три волны) слаборазрешенные волны окисления в области 0.8–1.1 В, соответствующие окислению третичных аминов (рис. 1). Полученные значения для **МБАК** близки к литературным данным [16]. Таким образом, введение заместителей в аминофрагмент, а также его отсутствие, подобно соединению **H-BAK-Met**, незначительно изменяет окислительно-восстановительные свойства бисарилиденовых красителей, а влияет лишь на растворимость соединения.

Объединенные графики нормированных электронных спектров поглощения и флуоресценции для соединений **МВАС**, **H-BAK-Met** и **NMe₂-**

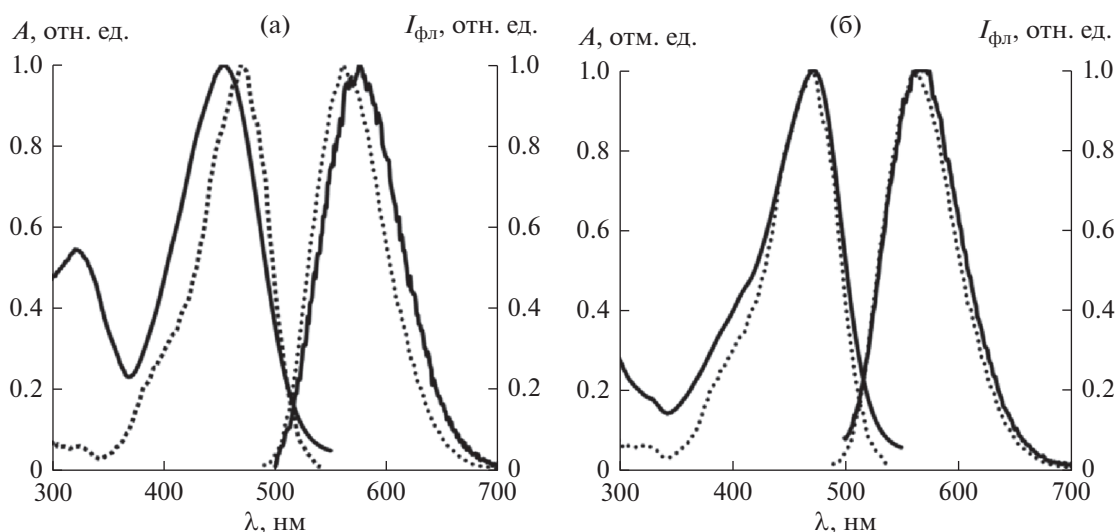


Рис. 2. Нормированные электронные спектры поглощения (A) и флуоресценции ($I_{\text{фл}}$) для соединений **МБАК** (пунктирная линия), **H-BAK-Met** (а) и **NMe₂-BAK-Met** (б) в ДМСО, $\lambda_{\text{ex}} = 450$ нм, при комнатной температуре.

БАК-Met в ДМСО представлены на рис. 2, фотофизические характеристики – в табл. 1. Все красители имеют интенсивную полосу поглощения в интервале 350–530 нм. Для **Н-БАК-Met** и **NMe₂-БАК-Met** наблюдается полоса поглощения, особенно заметная для **Н-БАК-Met**, в области ~300 нм. Появление этой полосы может быть обусловлено не столько отсутствием метакрилатных групп с одной стороны молекулы, сколько отсутствием донорной NMe₂-группы, приводящей к нарушению симметрии зарядов донорных и акцепторных составляющих молекулы. Гипсохромный сдвиг λ_{max} в спектре поглощения **Н-БАК-Met** относительно **МБАК** составляет 22 нм, при этом коэффициент экстинкции уменьшается в 1.34 раза (табл. 1). В то же время спектральные характеристики **NMe₂-БАК-Met** близки к таковым для **МБАК**. Максимумы λ флуоресценции для **Н-БАК-Met** и **NMe₂-БАК-Met** смещены в длинноволновую область относительно **МБАК** на 16 и 4 нм соответственно.

Облучение растворов **МБАК**, **Н-БАК-Met** и **NMe₂-БАК-Met** светом $\lambda = 395$ нм приводит к их обесцвечиванию (рис. 3а). Кинетика фотопревращения красителей описывается уравнением реакции второго порядка и соответствует межмолекулярному механизму переноса электрона и протона [11]. На рис. 3б представлена зависимость отношения оптических плотностей A/A_0 от времени экспозиции для каждого из красителей. Видно, что скорость фотопревращения для

Таблица 1. Фотофизические характеристики соединений **МБАК***, **Н-БАК-Met** и **NMe₂-БАК-Met** в ДМСО

Соединение	$\lambda_{\text{полл}}$, нм	ϵ , M ⁻¹ см ⁻¹	$\lambda_{\text{фл}}$, нм
МБАК	475	79400	560
Н-БАК-Met	453	59120	576
NMe₂-БАК-Met	472	78200	564

* Данные из [11].

NMe₂-БАК-Met ($k_{\text{NMe}_2\text{-БАК-Met}} = 1.32 \times 10^3 \text{ M}^{-1} \text{ c}^{-1}$) превышает таковую для **МБАК** ($k_{\text{МБАК}} = 0.62 \times 10^3 \text{ M}^{-1} \text{ c}^{-1}$) и **Н-БАК-Met** ($k_{\text{Н-БАК-Met}} = 0.25 \times 10^3 \text{ M}^{-1} \text{ c}^{-1}$) в 5 и 2 раза соответственно. Такое различие в скоростях реакции может быть обусловлено легкостью образования комплекса столкновения в случае **NMe₂-БАК-Met** за счет наличия незкранированной этиметакрилатными фрагментами NMe₂-группы.

Кинетику однофотонной фотополимеризации исследовали на ИК фурье-спектрометре ФТ-801 (ООО НПР “Симекс”, Новосибирск, Россия). ИК-спектры снимались методом нарушенного полного внутреннего отражения с интервалом 5 с. Облучение композиции проводили светодиодной системой с $\lambda = 365$ и 405 нм с диапазоном мощностей облучения 0–300 мВт/см². Конверсию (Р) определяли как уменьшение содержания двой-

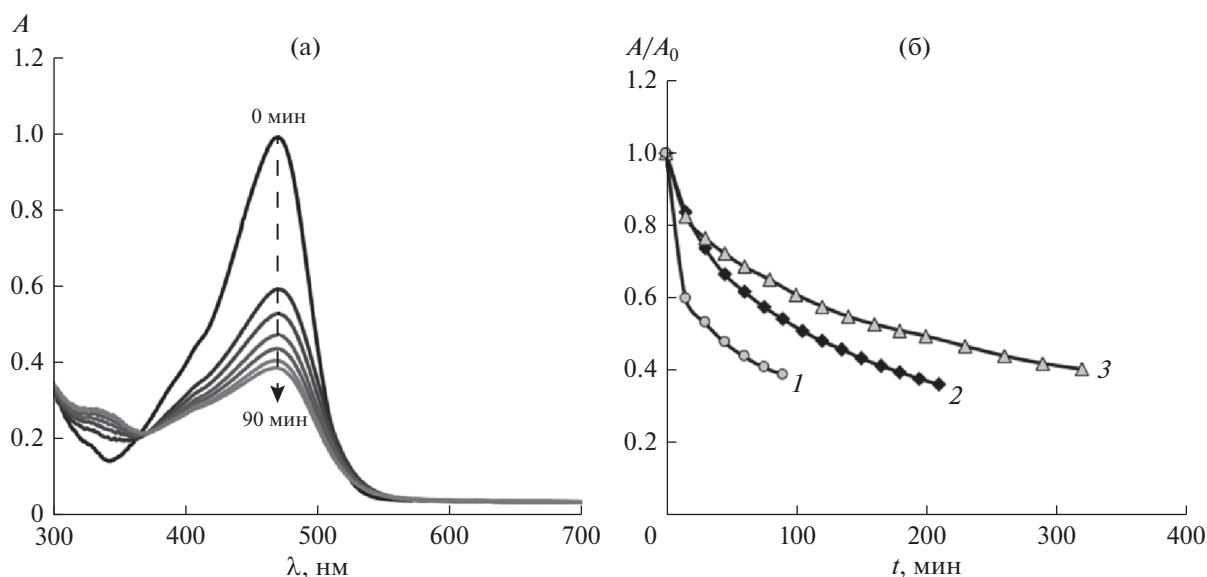


Рис. 3. Изменения спектров поглощения раствора **NMe₂-БАК-Met** (а) в ДМСО и зависимость отношений оптических плотностей A/A_0 от времени экспозиции t для соединений **NMe₂-БАК-Met** (1), **МБАК** (2) и **Н-БАК-Met** (3), $\lambda = 395$ нм, воздух.

Таблица 2. Кинетические параметры одно- и двухфотонной фотополимеризации ПЭТА в присутствии МБАК, Н-БАК-Met и NMe₂-БАК-Met

№	Фотоинициатор (ФИ)	[ФИ], мМ	$W_0 \times 10^3$, с ⁻¹	P , %	FW, мВт
К1	МБАК*	2.5	2.2	12	17–30
К2	Н-БАК-Met	2.5	3.9	17	10–47
К3	NMe ₂ -БАК-Met	2.5	4.0	19	6–50
К4	Н-БАК-Met	11.5	5.3	24	3–22

*Приведены данные из [12].

ных связей в реакционной смеси относительно количества двойных связей в исходной композиции. В качестве внутреннего стандарта служила полоса поглощения С=О-группы (1720 см⁻¹). Для изучения фотоиницирующей способности МБАК, Н-БАК-Met и NMe₂-БАК-Met были приготовлены четыре ФПК на основе ПЭТА, обозначение и состав которых представлены в табл. 2.

Все красители инициируют полимеризацию ПЭТА (рис. 4, табл. 2). Наибольшей эффективностью среди К1-К3 обладает NMe₂-БАК-Met в составе композиции К3. Композиция К1 имеет худ-

шие кинетические характеристики. Следует отметить, что растворимость Н-БАК-Met в ПЭТА значительно выше, чем у остальных красителей. Это позволяет изучать фотополимеризацию в присутствии Н-БАК-Met в широком диапазоне концентраций инициатора без использования добавок растворителя. Увеличение концентрации Н-БАК-Met в композиции в 5 раз (К4) приводит к увеличению как начальной скорости процесса, так и предельной конверсии мономера (табл. 2).

Фотоиницирующая способность композиций К1-К4 в двухфотонной фотополимеризации исследовали на установке Nanoscribe Photonics Professional. Режимы литографии для исследуемых ФПК были подобраны с использованием воздушного объектива 20× с числовой апертурой NA = 0.5. Для определения порога фотополимеризации и переэкспозиции проводили тест, в котором варьировали мощность лазерного излучения и скорость сканирования. Результаты приведены в табл. 2. Разность мощностей между порогом полимеризации и переэкспозицией представляет собой рабочий диапазон мощностей фотополимеризации или “окно изготовления” (FW – fabrication window). Поскольку стандартная рабочая скорость для изготовления 3D-структур составляет 100 мкм/с, то значения FW для К1-К4 определены для этой скорости (табл. 2). Введение в структуру МБАК этилметакрилатных групп позволяет существенно расширить интер-

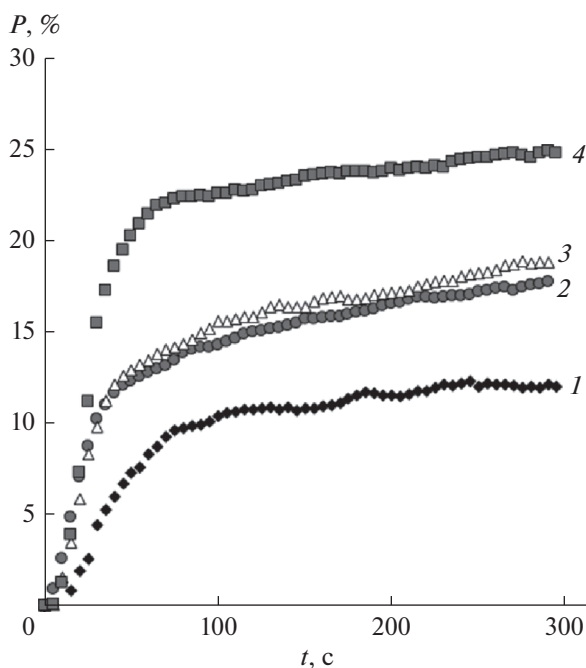


Рис. 4. Кинетические кривые однофотонной фотополимеризации ПЭТА: 1 – К1, 2 – К2, 3 – К3, 4 – К4. $\lambda = 395$ и 405 нм, мощность облучения 210 мВт/см². Время полимеризации 5 мин. Воздух.

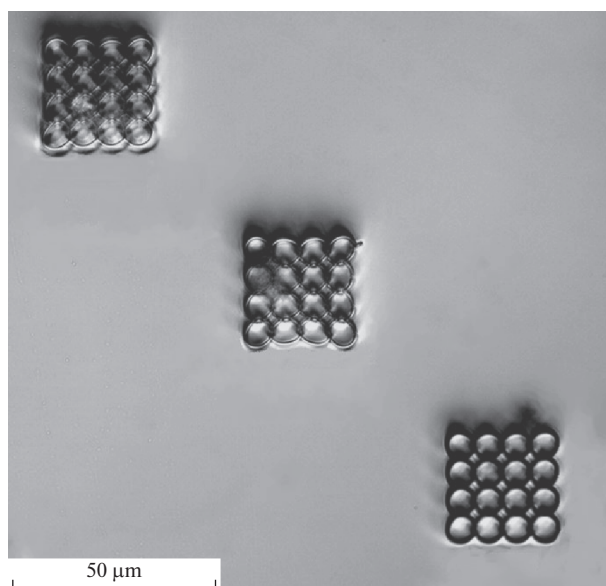


Рис. 5. Фотография полимерных цилиндрических спиральных микроструктур, полученных из композиции К4.

вал рабочих мощностей (К2 и К3, табл. 2). Увеличение содержания **Н-БАК-Met** в 5 раз (К4) снижает порог фотополимеризации до 3 мВт, но при этом переэкспозиция наблюдается уже при 22 мВт. Из этой композиции методом DLW-фотолиитографии были изготовлены 3D-микроструктуры сложной архитектуры, фотографии которых приведены на рис. 5.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Синтезированы новые несимметричные бис-арилденциклопентаноны **Н-БАК-Met** и **NMe₂-БАК-Met**. Установлено, что новые красители инициируют как одно-, так и двухфотонную фотополимеризацию ПЭТА, причем эффективность фотоиницирования **Н-БАК-Met** выше за счет лучшей его растворимости в ПЭТА. На примере композиции на основе **Н-БАК-Met** (11.5 мМ) в ПЭТА были изготовлены 3D-микроструктуры сложной архитектуры.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 19-73-10173). Работа выполнена с использованием оборудования центра коллективного пользования “Аналитический центр ИМХ РАН” при поддержке гранта “Обеспечение развития материально-технической инфраструктуры центров коллективного пользования научным оборудованием” (Уникальный идентификатор RF-2296.61321X0017, Номер Соглашения 075-15-2021-670).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Corrigan N., Yeow J., Judzewitsch P., Xu J., Boyer C.* // *Angew. Chem. Int. Ed.* 2018. V. 58. № 16. P. 5170.
2. *Schmitz C., Poplata T., Feilen A., Strehmel B.* // *Prog. Org. Coat.* 2020. V. 144. № 105663.
3. *Wu Q., Mo Y., Zhang Y., Li F., Deng M.* // *Macromol. Chem. Phys.* 2021. V. 222. № 20. P. 2100221.
4. *Zhang T., Jiang B., Huang Yu.* // *Compos. B. Eng.* 2018. V. 140. P. 214.
5. *Xu Y., Noirbent G., Brunel D., Ding Z., Gignes D., Graff B., Xiao P., Dumur F., Lalevée J.* // *Dyes Pigm.* 2021. V. 185. № 108900.
6. *Schumann M., Bückmann T., Gruhler N., Wegener M., Pernice W.* // *Light Sci. Appl.* 2014. V. 3. P. e175.
7. *Gehring H., Eich A., Schuck C., Pernice W.H.* // *Opt. Lett.* 2019. V. 44. № 20. P. 5089.
8. *Li Zh., Pucher N., Cicha K., Torgersen J., Ligon S.C., Ajami A., Husinsky W., Rosspeintner A., Vauthey E., Naumov S., Scherzer T., Stampfl J., Liska R.* // *Macromol.* 2013. V. 46. № 2. P. 352.
9. *Pooza L., Gottschaldt M., Markweg E., Hauptmann N., Hildebrand G., Pretzel D., Hartlieb M., Reichardt C., Kübel J., Schubert U.S., Mollenhauer O., Dietzek B., Liefelth K.* // *Adv. Eng. Mater.* 2017. V. 19. № 3. P. 1600686.
10. *Wan X., Zhao Yu., Xue J., Wu F., Fang X.* // *J. Photochem. Photobiol. A.* 2009. V. 202. № 1. P. 74.
11. *Huang X., Zhang Yu., Shi M., Zhang Yu., Zhao Yu.* // *Polym. Chem.* 2019. V. 10. P. 2273.
12. *Zhiganshina E.R., Arsenyev M.V., Chubich D.A., Kolymagin D.A., Pisarenko A.V., Burkatovsky D.S., Baranov E.V., Vitukhnovsky A.G., Lobanov A.N., Matital R.P., Aleynik D.Ya., Chesnokov S.A.* // *Eur. Polym. J.* 2021. V. 162. P. 110917.

13. *Armarego W.L.F., Chai C.L.L.* Purification of laboratory chemicals. Amsterdam: Elsevier Inc. Butterworth-Heinemann, 2003.
14. *Vatsadze S.Z., Sviridenkova N.V., Manaenkova M.A., Semashko V.S., Zyk N.V.* // Russ. Chem. Bull. 2005. V. 54. № 9. P. 2224.
15. *Galambos J., Wágner G., Nógrádi K., Bielik A., Molnár L., Bobok A., Horváth A., Kiss B., Kolok S., Nagy J., Kurkó D., Bakk M.L., Vastag M., Sághy K., Gyertyán I., Gál K., Greiner I., Szombathelyi Z., Keseru G.M., Domány G.* // Bioorganic Med. Chem. Lett. 2010. V. 20. № 15. P. 4371.
16. *Vatsadze S.Z., Gavrilova G.V., Zyuz'kevich F.S., Nuriev V.N., Krut'ko D.P., Moiseeva A.A., Shumyantsev A.V., Vedernikov A.I., Churakov A.V., Kuz'mina L.G., Howard J.A.K., Gromova S.P.* // Russ. Chem. Bull. 2016. V. 65. № 7. P. 1761.