

УДК 54-126. 66.085.2. 54.062

## (МЕТ)АКРИЛАТСОДЕРЖАЩИЕ ФОТОИНИЦИАТОРЫ СВОБОДНО-РАДИКАЛЬНОЙ ПОЛИМЕРИЗАЦИИ НА ОСНОВЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-ЭКРАНИРОВАННЫХ *o*-БЕНЗОХИНОНОВ

© 2022 г. Э. Р. Жиганшина<sup>а</sup>, \*, В. С. Лысенков<sup>а</sup>, Т. И. Лопатина<sup>а</sup>,  
М. В. Арсеньев<sup>а</sup>, С. А. Чесноков<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлоорганической химии им. Г.А. Разуваева Российской академии наук, ул. Троицкая, 49, Нижний Новгород, 603950 Россия

\*E-mail: zhiganshinae@mail.ru

Поступила в редакцию 28.12.2021 г.

После доработки 10.01.2022 г.

Принята к публикации 14.01.2022 г.

Синтезированы новые мономеры-инициаторы, производные 3,5-ди-*трет*-бутил-*o*-бензохинона, содержащие фрагменты 2-гидроксиэтилметакрилата (МЭГ) и пентаэритритол триакрилата (ПЭТА). Исследована активность новых *o*-хинонов (соинициатор *N,N*-диметилциклогексиламин) в реакции фотоиницирования полимеризации олигокарбонатдиметакрилата ОКМ-2 под действием видимого излучения. Изучена термическая стабильность полученных полимеров. Сополимеризацией синтезированных *o*-хинонов с МЭГ и ПЭТА (инициатор динитрил азоизомаляной кислоты, 80°C) получены полимеры и оценена миграция из них *o*-хинонов.

**Ключевые слова:** *o*-бензохинон, амин, олигоэфирметакрилат, фотополимеризация, термополимеризация, миграция, термогравиметрический анализ

DOI: 10.31857/S0023119322030135

### ВВЕДЕНИЕ

Реакция радикальной фотополимеризации широко используется в современной промышленности при фотоотверждении красок [1], покрытий и адгезивов [2, 3], в медицине [4, 5], стереолитографическом синтезе 3D-объектов [6–8], оптоэлектронике [9], создании матриц для тканевой инженерии [10, 11] и др. В основе этих процессов лежит использование инициирующих систем, генерирующих под действием излучения свободные радикалы. Помимо них, в результате фотопревращения инициатора образуются продукты, способные мигрировать из сшитых полимерных матриц, вызывая пожелтение и специфический запах полимера. Вариант решения проблемы — создание полимеризационноспособных фотоинициаторов, которые могут не только генерировать инициирующие свободные радикалы, но также сополимеризоваться с мономерами в составе фотополимеризующейся композиции (ФПК). Известны полимеризационноспособные карбонилсодержащие фотоинициаторы II типа на основе тиоксанта [12, 13] и бензофенона [14, 15]. Однако они чувствительны в УФ (тиоксанта и бензофенона), что ограничивает применение разнообразных источников инициирующего излучения. В то же

время такие фотоинициаторы II типа, как *o*-бензохиноны, инициируют полимеризацию под действием видимого света от 400 до 650 нм, что открывает возможность фотоотверждения “толстых” слоев композиции [16]. Наиболее изучены 3,5- и 3,6-ди-*трет*-бутил-*o*-бензохиноны. Ранее из 3,6-ди-*трет*-бутил-*o*-бензохинона и 2-гидроксиэтилметакрилата (МЭГ) был получен метакрилатсодержащий *o*-бензохинон [17]. Однако он не эффективен как инициатор фотополимеризации [18]. Другой вариант триалкилзамещенных *o*-бензохинонов — это производные 3,5-ди-*трет*-бутил-6-(метоксиметил)-*o*-бензохинона [19–21]. Такие *o*-бензохиноны совместно с третичными аминами эффективно инициируют фотополимеризацию диметакрилата триэтиленгликоля [16]. В настоящей работе синтезированы новые (мет)акрилсодержащие *o*-бензохиноны, содержащие фрагменты пентаэритритол триакрилата (ПЭТА) и МЭГ. Исследована их реакционная способность в реакции фотовосстановления и в фотоиницировании полимеризации олигокарбоната диметакрилата ОКМ-2. Определены температуры разложения синтезированных полимеров. Проведены сравнительные исследования миграции новых (мет)акрилсодержащих *o*-бензохинонов и 3,5-ди-

*трет*-бутил-6-(метоксиметил)-*о*-бензохинона из полимерных матриц. Структурные формулы ис-

пользуемых в работе соединений и их обозначения приведены на схеме 1.

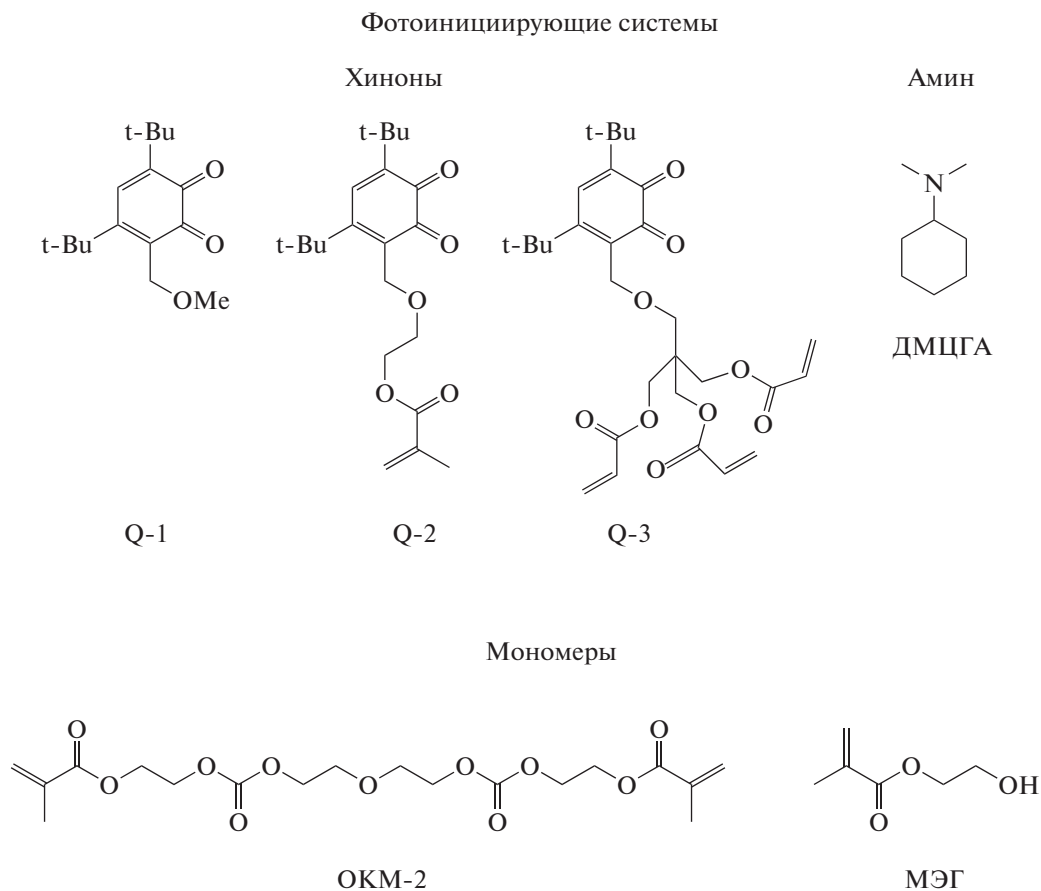


Схема 1

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Реагенты: 3,5-ди-*трет*-бутил-6-(метоксиметил)пирокатехин (**1**) и 3,5-ди-*трет*-бутил-6-(метоксиметил)-*о*-бензохинон (**Q-1**) синтезированы по описанной в [19] методике. *N,N*-диметилциклогексиламин (ДМЦГА) (“Aldrich”) и изопропиловый спирт использовали без дополнительной очистки. Диметакрилат  $\alpha,\alpha$ -бис-(метакрилоксиэтиленкарбонат)-диэтиленгликоль — ОКМ-2 (ООО “Корунд”, Россия) и 2-гидроксиэтилметакрилат (МЭГ) (“Aldrich”) использовали без дополнительной очистки. Динитрил азоизомасляной кислоты (ДАК) (“Реахим”) и толуол очищали по стандартным методикам [22].

2-((4,6-ди-*трет*-бутил-2,3-дигидроксибензил)-этил метакрилат (**2**). МЭГ (0.50 г, 3.9 ммоль) и

3,5-ди-*трет*-бутил-6-метоксиметилпирокатехин **1** (1.06 г, 3.9 ммоль) растворяли в *n*-гексane (15 мл) и кипятили с обратным холодильником в течение 24 ч с постепенным упариванием смеси до 5 мл. Затем реакционную смесь охлаждали и полностью удаляли растворитель. Неочищенный продукт перекристаллизовывали из *n*-гексана и выделяли в виде белого кристаллического порошка. Выход: 1.16 г (80%).  $T_{пл} = 135-137^\circ\text{C}$ . Рассчитано для  $\text{C}_{21}\text{H}_{32}\text{O}_5$ : С, 69.20; Н, 8.85. Найдено: С, 69.15; Н, 8.87.  $^1\text{H}$  (300 МГц, DMSO,  $\delta$ , м.д.): 1.29 (с, 9H, t-Bu), 1.32 (с, 9H, t-Bu), 1.84 (с, 3H, -CH<sub>3</sub>), 3.74 (т, 2H, -CH<sub>2</sub>-, J = 8.8 Гц), 4.22 (т, 2H, -CH<sub>2</sub>-, J = 8.8 Гц), 4.68 (с, 2H, CH<sub>2</sub>O), 5.65 (с, 1H, CH<sub>2</sub>=), 6.00 (с, 1H, CH<sub>2</sub>=), 6.71 (с, 1H, Car-H), 7.79 (с, 1H, OH), 7.95 (с, 1H, OH).  $^{13}\text{C}$  (75 МГц,

DMSO,  $\delta$ , м.д.): 18.41, 29.91, 32.77, 35.02, 35.66, 64.27, 66.00, 68.36, 115.08, 122.08, 126.27, 134.90, 136.24, 138.74, 143.15, 146.14, 173.00. ИК-спектр (вазелиновое масло),  $\nu/\text{см}^{-1}$ : 1020, 1096, 1295 (C—O), 1621, 1640, 3393, 3497 (OH).

**2-((2,4-ди-*трет*-бутил-5,6-диоксоциклогекса-1,3-диен-1-ил)метокси)этил метакрилат (Q-2).** К раствору пирокатехина **2** (1.16 г, 3.2 ммоль) в Et<sub>2</sub>O (40 мл) при интенсивном перемешивании добавляли раствор K<sub>3</sub>Fe(CN)<sub>6</sub> (5.26 г, 16 ммоль) и KOH (0.36 г, 6.4 ммоль) в воде (80 мл). Реакционную смесь активно перемешивали в течение 45 мин при комнатной температуре. После этого смесь промывали водой (3×80 мл) и экстракт сушили над безводным сульфатом натрия. Растворитель упаривали и остаток *o*-бензохинона перекристаллизовали из *n*-гексана (20 мл). Выход 1.10 г (78%).  $T_{\text{пл}} = 118\text{--}120^\circ\text{C}$ . Рассчитано для C<sub>21</sub>H<sub>30</sub>O<sub>5</sub>: С, 69.59; Н, 8.34. Найдено: С, 69.61; Н, 8.31. <sup>1</sup>H (400 МГц, CDCl<sub>3</sub>,  $\delta$ , м.д.): 1.24 (с, 9H, *t*-Bu), 1.38 (с, 9H, *t*-Bu), 1.93 (с, 3H, —CH<sub>3</sub>), 3.73 (т, 2H, —CH<sub>2</sub>—,  $J = 8.8$  Гц), 4.29 (т, 2H, —CH<sub>2</sub>—,  $J = 8.8$  Гц), 4.48 (с, 2H, CH<sub>2</sub>O), 5.65 (с, 1H, CH<sub>2</sub>=), 6.12 (с, 1H, CH<sub>2</sub>=), 7.08 (с, 1H, C<sub>ар</sub>—H). <sup>13</sup>C (100 МГц, CDCl<sub>3</sub>,  $\delta$ , м.д.): 18.30, 29.09, 30.00, 35.43, 38.71, 62.55, 63.78, 68.72, 125.75, 132.17, 136.13, 137.08, 148.75, 159.96, 167.28, 179.42, 182.26. ИК-спектр (вазелиновое масло),  $\nu/\text{см}^{-1}$ : 1098, 1231, 1617, 1657, 1746 (C=O и C=C).

**2-(((4,6-ди-*трет*-бутил-2,3-дигидроксибензил)окси)метил)пропан-1,2,3-триил триакрилат (3).** ПЭТА (1.18 г, 3.9 ммоль) и соединение **1** (1.06 г, 3.9 ммоль) растворяли в хлороформе (15 мл) и кипятили с обратным холодильником в течение 24 ч с постепенным упариванием смеси до 5 мл. Затем реакционную смесь охлаждали и полностью удаляли растворитель. Неочищенный продукт **3** без выделения использовали для дальнейшей реакции окисления.

**2-(((2,4-ди-*трет*-бутил-5,6-диоксоциклогекса-1,3-диен-1-ил)метокси)метил)пропан-1,2,3-триил триакрилат (Q-3).** К раствору **3** (1.16 г, 2.2 ммоль) в Et<sub>2</sub>O (40 мл) при интенсивном перемешивании добавляли K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (1.52 г, 11 ммоль), а затем гранулы I<sub>2</sub> (0.55 г, 2.2 ммоль). Реакционную смесь активно перемешивали в течение 12 ч при комнатной температуре. Выпавший белый осадок минеральных солей отфильтровывали. Эфирный раствор образовавшегося продукта упаривали. Хинон **Q-3** выделяли колоночной хроматографией (элюент толуол : ацетон = 30 : 1) в виде темно-красного масла. Выход: 0.58 г (50%). Рассчитано для C<sub>28</sub>H<sub>36</sub>O<sub>9</sub>: С, 65.10; Н, 7.02. Найдено: С, 65.08; Н, 7.10. <sup>1</sup>H (400 МГц, CDCl<sub>3</sub>,  $\delta$ , м.д.): 1.21 (с, 9H, *t*-Bu), 1.37

(с, 9H, *t*-Bu), 3.32 (с, 2H, —OCH<sub>2</sub>), 4.15 (с, 6H, —CH<sub>2</sub>—), 4.38 (с, 2H, —CH<sub>2</sub>O—), 5.84 (м, 6H, CH<sub>2</sub>=,  $J = 6.5$  Гц), 6.09 (м, 3H, CH=,  $J = 6.5$  Гц), 7.06 (с, 1H, C<sub>ар</sub>—H). <sup>13</sup>C (100 МГц, CDCl<sub>3</sub>,  $\delta$ , м.д.): 29.06, 29.99, 36.36, 40.89, 42.19, 62.63, 64.12, 66.29, 127.95, 131.27, 137.21, 148.45, 159.53, 165.48, 179.49, 182.34.

Спектрофотометрические исследования проводили на спектрофотометре СФ-56 (“ЛОМО”, Россия). Кинетику фотовосстановления *o*-бензохинонов в присутствии ДМЦГА исследовали по методике, описанной в [16]. Кинетику фотополимеризации ОКМ-2 исследовали термографическим методом, как описано в [16]. Источник света лампа КГМ-24-250 с фокусирующим устройством. Освещенность в области измерительной ячейки установки 40 кЛк.

Для исследования миграционных свойств *o*-бензохинонов, готовили композиции растворением 0.1 М *o*-бензохинона, 30 мМ ДАК в смеси ОКМ-2 с МЭГ в массовом соотношении 1 : 1. Композицию помещали в полость формы, образованной двумя силикатными стеклами с демпфирующей прокладкой между ними толщиной 1 мм и грели при 80°C в течение 6 ч. Затем из формы извлекали образец, размельчали его на частицы размером менее 300 мкм и экстрагировали 1 г полимера 20 мл изопропилового спирта при комнатной температуре. В заданный момент времени регистрировали спектр поглощения раствора и по значению максимума оптической плотности (~400 нм) определяли содержание фотоинициатора в экстракте.

Термогравиметрический анализ (ТГА) выполняли на установке синхронного термического анализа TGA/DSC<sub>3+</sub> METTLER TOLEDO; скорость нагрева 5°C/мин от 30 до 500°C; азот, скорость потока 50 мл/мин.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

По реакции трансэтерификации 3,5-ди-*трет*-бутил-6-метоксиметилпирокатехина **1** с гидроксилсодержащими мономерами ПЭТА и МЭГ синтезированы новые катехол(мет)акрилаты **2** и **3**, соответственно. Окислением пирокатехинов **2** и **3** получены *o*-хиноны **Q-2** и **Q-3** (Схема 2). Строение полученных соединений подтверждено данными ЯМР, ИК, УФ-спектроскопий.

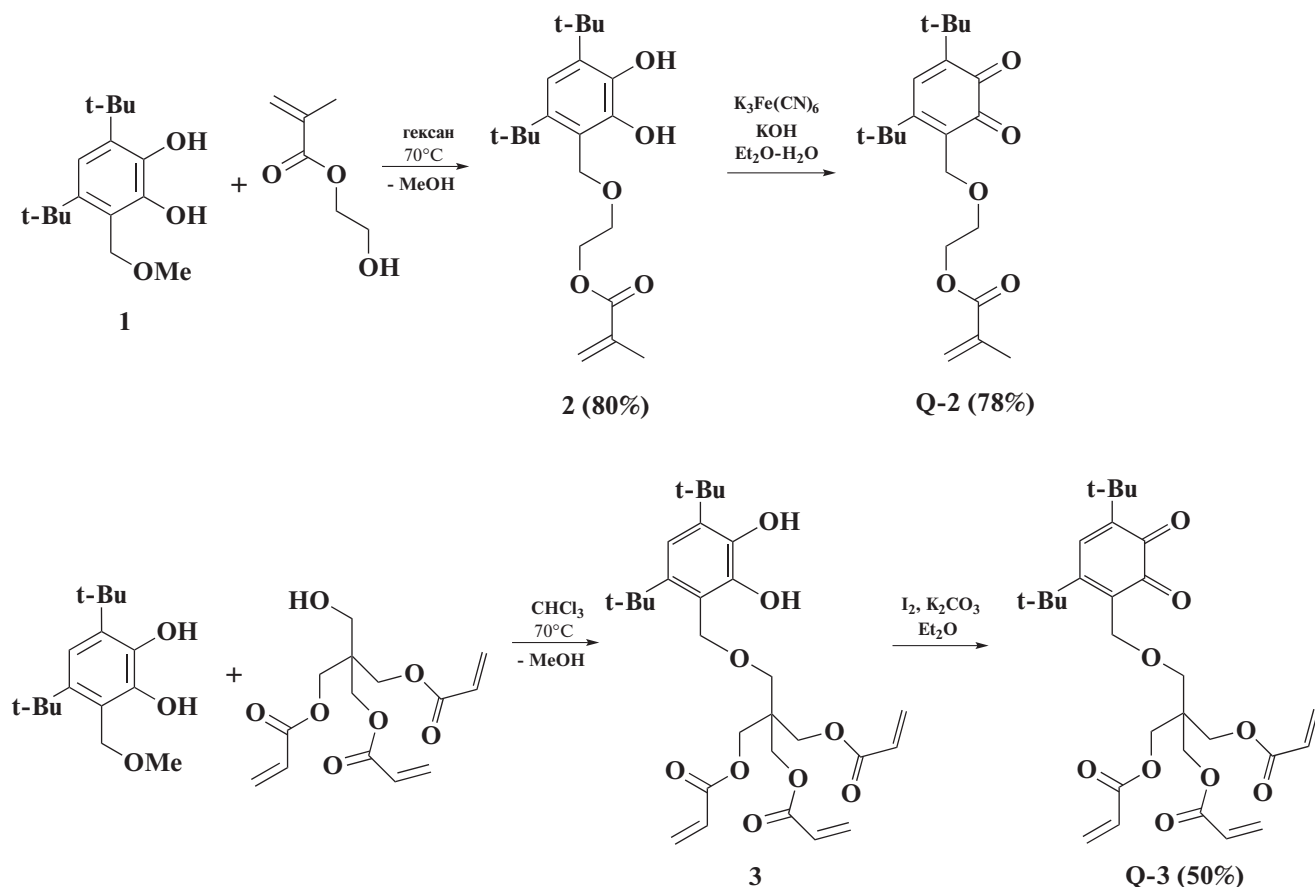


Схема 2

В электронных спектрах поглощения *o*-хинонов **Q-1–Q-3** в видимой области наблюдаются две полосы, соответствующие  $S(\pi \rightarrow \pi^*)$  и  $S(n \rightarrow \pi^*)$  электронным переходам карбонильных групп. Спектральные характеристики *o*-бензохинонов **Q-2** и **Q-3** мало отличаются от **Q-1** (табл. 1). Облучение толуольных растворов **Q-1–Q-3** светом  $\lambda \gg 475$  нм в присутствии ДМЦГА приводит к их обесцвечиванию, что говорит о протекании реакции фотовосстановления хинонов (Схема 3) [23]. Реакция фотовосстановления *o*-хинонов заключается в фотопереносе атома

водорода с молекулы амина на фотовозбужденную молекулу хинона и значительно замедляется в присутствии кислорода. Из данных табл. 1 видно, что и в аргоне, и на воздухе пара **Q-3–ДМЦГА** является более реакционноспособной. Сопоставление величин эффективной константы скорости фотовосстановления хинонов ( $k_H$ ) в атмосфере аргона и на воздухе показывает, что увеличение объема заместителей при хиноновом фрагменте приводит к уменьшению влияния кислорода на скорость реакции.



Схема 3

**Таблица 1.** Спектральные характеристики *o*-хинонов **Q-1–Q-3**<sup>a</sup> и величины  $k_H$  *o*-хинонов **Q-1–Q-3** в присутствии ДМЦГА в инертной атмосфере и на воздухе<sup>b</sup> [Q] = 0.42 мМ, [ДМЦГА] = 2.1 мМ, Лампа КГМ-24-150,  $I = 13$  кЛк

Хинон	$\lambda_{\max}$ , нм ( $\epsilon$ , моль <sup>-1</sup> л см <sup>-1</sup> ) $\pi \rightarrow \pi^*$	$\lambda_{\max}$ , нм $n \rightarrow \pi^*$	Q–ДМЦГА	$k_H \times 10^3$ , с <sup>-1</sup>		$k_H(\text{Ar})/k_H(\text{возд})$
				Ar	воздух	
<b>Q-1</b>	403 (2150)	581	<b>Q-1</b>	0.76	0.58	1.30
<b>Q-2</b>	404 (2180)	584	<b>Q-2</b>	0.45	0.34	1.18
<b>Q-3</b>	404 (1900)	582	<b>Q-3</b>	0.94	0.78	1.20

<sup>a</sup> Исследования проводили в изопропиловом спирте. <sup>b</sup> Исследования проводили в толуоле.

**Таблица 2.** Значения начальной ( $W_0$ ) и максимальной приведенной ( $W/[M]_{\max}$ ) скоростей, периода индукции ( $T_{\text{инд}}$ ) и конверсии за 30 мин ( $P$ ) при фотополимеризации ОКМ-2 в присутствии *o*-бензохинонов **Q-1–Q-3** паре с ДМЦГА [Q] = 3.78 мМ, [ДМЦГА] = 0.1 М. Лампа КГМ-24-150,  $I = 40$  кЛк

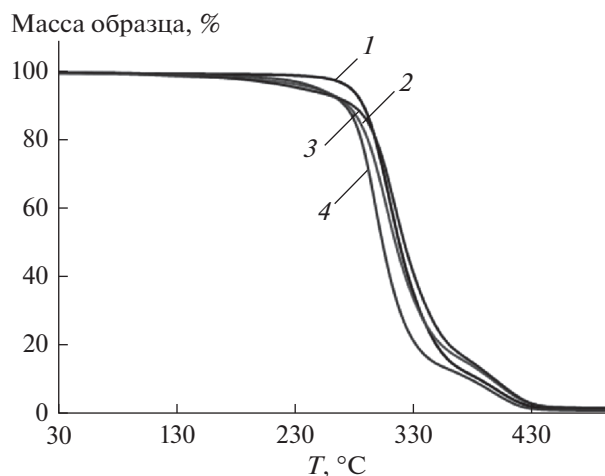
Обозначение ФПК	Q–ДМЦГА–ОКМ-2	Условия	$T_{\text{инд}}$ , с	$W_0$ , с <sup>-1</sup>	$W/[M]_{\max} \times 10^3$ , с <sup>-1</sup>	$P$ , %
<b>П1</b>	<b>Q-1</b>	Вакуум	28	0.042	1.96	80
		Воздух	43	0.019	1.71	73
<b>П2</b>	<b>Q-2</b>	Вакуум	26	0.040	1.77	82
		Воздух	45	0.037	1.75	79
<b>П3</b>	<b>Q-3</b>	Вакуум	26	0.040	1.81	76
		Воздух	43	0.031	1.80	71

В результате реакции фотовосстановления образуются радикальные продукты, способные инициировать фотополимеризацию (радикал R, Схема 3). В табл. 2 представлены величины кинетических параметров полимеризации ОКМ-2 в присутствии системы *o*-бензохинон (**Q-1–Q-3**)–ДМЦГА. Видно, что введение (мет)акрилатных фрагментов в структуру 3,5-ди-*трет*-бутил-*o*-бензохинона существенно уменьшает влияние кислорода на кинетику протекания полимеризации (значения  $W_0$  и  $W/[M]_{\max}$ ).

Термическая стабильность полимерных образцов П1–П3 оценивали методом ТГА в атмосфере азота. На рис. 1 представлены термограммы для исследуемых полимеров.

Для образцов П1–П3 на основе ОКМ-2 наблюдается двухступенчатое термическое разложение в интервале температур 30–500°C. Начальная температура разложения может быть связана с разрушением С–С-связей боковых цепей в сетчатом полимере. Вторая ступень является результатом деградации жестких сегментов основных цепей, формирующих сетчатую структуру полимера [24]. Введение в состав ФПК *o*-хинонов **Q-1–Q-3**, в целом, не оказывает влияния на ход термогравиметрических кривых (рис. 1) и, соответственно,

на параметры ТГА, представленные в табл. 3. Однако,  $T_{5\%}$  для П1–П3 ниже на 25–30°C, чем для безхинонового полиОКМ-2. Это может быть связано с наличием олигомерных цепей, температура разложения С–С-связей которых ниже по сравне-



**Рис. 1.** Термогравиметрические кривые разложения фотополимеров: 1 – без хинона, 2 – П1, 3 – П2, 4 – П3.

**Таблица 3.** Параметры термогравиметрических кривых для исследуемых полимерных образцов  $T_n$  и  $T_k$  – температуры начала и окончания разложения полимера,  $T_{5\%}$  и  $T_{50\%}$  – температуры при потере массы полимера на 5 и 50% соответственно

Обозначение	$T_n$ , °C	$T_k$ , °C	$T_{5\%}$ , °C	$T_{50\%}$ , °C
полиОКМ-2	280	430	277	315
П1	282	425	248	315
П2	287	427	239	320
П3	277	421	250	303

нию с их высокомолекулярными аналогами. Такие цепи образуются в результате реакции обрыва растущих макрорадикалов феноксильными радикалами в ходе процесса фотополимеризации. Наличие (мет)акрилатных групп у *o*-хинонов **Q-2** и **Q-3** не повлияло на величину  $T_n$  образцов П2 и П3 из-за низкой концентрации фотоинициатора.

Введение в структуру молекулы фотоинициатора одного или трех (мет)акрилатных фрагментов приводит к возможности его встраивания в полимерную цепь и уменьшению вымывания из конечного полимера. Это было подтверждено в эксперименте по оценке вымывания хиноновых фрагментов из полимера, полученного термической полимеризацией смеси ОКМ-2 : МЭГ в соотношении 1 : 1 в течение 20 дней (добавка монометакрилата МЭГ приводит к уменьшению числа сшивок и облегчает миграцию невстроившихся хиноновых фрагментов) (табл. 4). На рис. 2 показаны спектры поглощения экстрактов после выдерживания в них образцов в течение 20 дней. Видно, что концентрация **Q-1** в экстракте из полимера (рис. 2, спектр 1) в 6 и 4.7 раза выше, чем в экстрактах из образцов на основе **Q-2** и **Q-3** (рис. 2, спектры 2 и 3) соответственно. Вымывание **Q-2** составляет 9% за 20 дней вымачивания, в

то время как вымывание фотоинициатора **Q-3** не наблюдается совсем. Эти данные подтверждают сохранение реакционной способности (мет)акрилатных фрагментов в хинонах в реакции сополимеризации с другими мономерами. При этом, строение и число мономерных блоков в составе инициатора влияет на его способность встраиваться в матрицу получаемого полимера.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

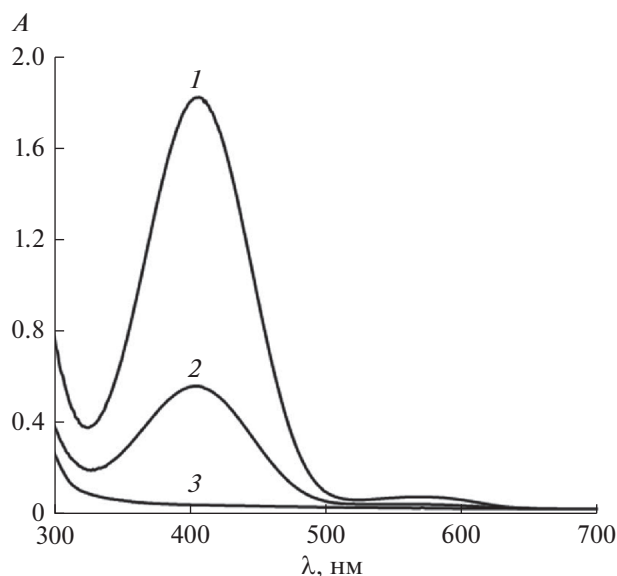
Синтезированы новые (мет)акрилсодержащие фотоинициаторы, включающие в себя фрагменты 2-гидроксиэтилметакрилата (**Q-2**) и пентаэритритол триакрилата (**Q-3**) и чувствительные в видимом спектральном диапазоне. Показано, что введение (мет)акрилатных фрагментов в структуру 3,5-ди-*трет*-бутил-*o*-бензохинона не оказывает влияния на эффективность фотоиницирования полимеризации диметакрилата ОКМ-2, снижая при этом влияние кислорода на кинетику протекания процесса. Термическая стабильность полученных в ходе фотополимеризации полимеров не уступает стабильности полиОКМ-2, синтезированного без участия *o*-бензохинонов. Наличие (мет)акрилатных групп в **Q-2** и **Q-3** обеспечивает низкую миграцию *o*-бензохинонов из сополимеров МЭГ с ОКМ-2.

## 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).

**Таблица 4.** Относительная концентрация *o*-бензохинона в экстракте, %. [Q] = 0.1 М, [ДАК] = 30 мМ, массовое соотношение ОКМ-2 : МЭГ = 1 : 1

Q–ОКМ-2–МЭГ ДАК	Относительная концентрация фотоинициатора в экстракте, %			
	1 день	5 дней	10 дней	20 дней
<b>Q-1</b>	31.2	46.5	52.8	54.7
<b>Q-2</b>	3.0	4.3	8.1	9.0
<b>Q-3</b>	0	0	0	0



**Рис. 2.** Электронные спектры поглощения экстрактов в изопропиловом спирте измельченных образцов, содержащих: 1 – Q-1, 2 – Q-2, 3 – Q-3. Общее время экстрагирования 20 дней.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wang D. Aqueous colored photocurable paint and preparation method thereof. A.c. CN 2021-10066000 Chinese // 2021. P. 11.
2. Hou H., Gan Ya., Yin J., Jiang X. // Langmuir. 2017. V. 33. № 8. P. 2027.
3. Shah A.H., Kartheek P., Gandhi P., Jonnalagadda K., Steele T.W.J. // Macromol. Mater. Eng. 2019. № 1900230.
4. Ao-Ieong W.-S., Chien S.-T., Jiang W.-C., Yet S.-F., Wang J. // Polymers. 2021. V. 13. № 1960.
5. Seror J., Stern M., Zarka R., Orr N. // Plast. Reconstr. Surg. 2021. V. 148. № 6S. P. 32S.
6. Bagheri A., Jin J. // ACS Appl. Polym. Mater. 2019. V. 1. № 4.
7. van Bochove B., Hannink G., Buma P., Grijpma D. W. // Macromol. Biosci. 2016. V. 16. № 12. P. 1853.
8. Sutton J., Rajan K., Harper D.P., Chmely S.C. // ACS Appl. Mater. Interfaces. 2018. V. 10. № 42. P. 36456.
9. Chen Yu., Sun C., Zhou H., Li J., Xin W., Xu H., Zhu H. // J. Phys. Chem. Lett. 2021. V. 12. № 40. P. 9989.
10. Levett P.A., Melchels F.P.W., Schrobback K., Huttmacher D.W., Malda J., Klein T.J. // Acta Biomater. 2013. V. 10. № 1. P. 214.
11. Ferracci G., Zhu M., Ibrahim M. S., Ma G., Fan T. F., Lee B. H., Cho N.-J. // ACS Appl. Bio Mater. 2020. V. 3. № 2. P. 920.
12. Wu Q., Mo Y., Zhang Y., Li F., Deng M. // Macromol. Chem. Phys. 2021. V. 222. № 20. P. 2100221.
13. Eren T. N., Okte N., Morlet-Savary F., Fouassier J.P., Lalevee J., Avci D. // J. Polym. Sci. A: Polym. Chem. 2016. V. 54. № 20. P. 3370.
14. Zhang T., Jiang B., Huang Yu. // Compos. B. Eng. 2018. V. 140. P. 214.
15. Tang Y., Zhang Y., Yang J., Nie J. // J. Polym. Sci. A: Polym. Chem. 2017. V. 55. P. 313.
16. Shurygina M.P., Zakharina M. Yu., Baten'kin M.A., Konev A.N., Shavyrin A.S., Chelnokov E.A., Shushunova N.Yu., Arsenyev M.V., Chesnokov S.A., Abakumov G.A. // Eur. Polym. J. 2020. V. 127. № 109573.
17. Arsenyev M.V., Shurygina M.P., Poddel'sky A.I., Druzhkov N.O., Chesnokov S.A., Fukin G.K., Cherkasov V.K., Abakumov G.A. // J. Polym. Res. 2013. V. 20. P. 98.
18. Шушунова Н.Ю., Арсеньев М.В., Глухова Т.А., Зайцев С.Д., Чесноков С.А. // Высокомолекулярные Соединения Серия Б. 2015. Т. 57. № 3. С. 198.
19. Arsenyev M.V., Baranov E.V., Shurygina M.P., Chesnokov S.A., Abakumov G.A. // Mendeleev Commun. 2016. V. 26. № 6. P. 552.
20. Poddel'sky A.I., Arsenyev M.V., Astaf'eva T.V., Chesnokov S.A., Fukin G.K., Abakumov G.A. // J. Organomet. Chem. 2017. V. 835. P. 17.
21. Zhiganshina E.R., Arsenyev M.V., Shavyrin A.S., Baranov E.V., Chesnokov S.A. // Mendeleev Commun. 2019. V. 29. P. 91.
22. Armarego W.L.F., Chai C.L.L. Purification of laboratory chemicals. Amsterdam: Elsevier Inc. Butterworth-Heinemann, 2003.
23. Shurygina M.P., Kurskii Yu.A., Druzhkov N.O., Chesnokov S.A., Abakumov G.A. // High Energ. Chem. 2010. V. 44. P. 234.
24. Si Q.F., Wang X., Fan X.D., Wang S.J. // J. Polym. Sci. A: Polym. Chem. 2005. V. 43. P. 1883.