

*Б. А. Буравов, Е. С. Бочкарев, А. Аль-Хамзави, Н. В. Сидоренко, О. О. Тужиков, О. И. Тужиков*

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СПЕЙСЕРА НА ОСОБЕННОСТИ ФОТООТВЕРЖДЕНИЯ ФОСФОРСОДЕРЖАЩИХ МЕТАКРИЛАТОВ РАЗЛИЧНОЙ ФУНКЦИОНАЛЬНОСТИ

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: byravov@ya.ru

В статье представлены результаты исследований особенностей фотоотверждения трехфункционального и тетрафункциональных фосфорсодержащих метакрилатов с различными спейсерами в структуре. Методом дифференциальной сканирующей калориметрии установлено, что введение спейсеров приводит к уменьшению общего теплового эффекта процесса фотоотверждения по сравнению с беспейсерным образцом.

С помощью фотоячейки к измерителю иммитанса E7-25, которая способна фиксировать изменения диэлектрических свойств во времени, определено влияние спейсера и его строения на степень завершенности процесса фотоотверждения. Показано влияние вводимого спейсера на процесс формирования сшитого полимера, что проявляется разными временами индукционного периода.

**Ключевые слова:** синтез, глицидилметакрилат, трихлорид фосфора, фосфорсодержащие метакрилаты, спейсер, фотоотверждение, конверсия, ДСК, диэлектрические свойства.

### Введение

Фотополимеризующиеся композиции нашли широкое применение в лакокрасочной и электронной промышленности, автомобилестроении, космической технике, при производстве элементов декора, стоматологии и стереолитографии [1–3]. Одним из условий их эксплуатации является низкая горючесть, малая усадка, низкая токсичность и пр. Перспективным направлением в разработке подобных материалов является использование фосфорсодержащих полимеризационноспособных соединений (ФПС), содержащих в структуре спейсер (вставку) разного строения и молекулярной массы. Изменение структуры, молекулярной массы и функциональности мономерных соединений, как правило, оказывает влияние на свойства отвержденных материалов, что определяется в том числе процессами формирования сетчатых полимеров.

В представленной работе приведены результаты исследований влияния количества и типа функциональных групп, химической струк-

туры спейсера на процесс фотоотверждения ФПС методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) и их влияние на изменение диэлектрических свойств.

### Экспериментальная часть

Для синтеза функциональных соединений, способных отверждаться под действием УФ-излучения, использовали трихлорид фосфора (ТУ 2152-380-05763441-2002), глицидилметакрилат (ГМАК) (Sigma-Aldrich), аллилглицидиловый эфир (Sigma-Aldrich), активный разбавитель эпоксидных смол марки Э-181 (ТУ 2225-606-11131395-2003) и эпоксидную смолу марки ЭД-20 (ГОСТ 10587-84). Для инициирования фотоотверждения применяли инициатор – бис(2,4,6-триметилбензоил)фенилфосфин-оксид (BAPhO) (Sigma-Aldrich).

Для исследований синтезировали один трехфункциональный и три четырехфункциональных ФПС:

– (ФПС-1) – трехфункциональный мономер, не содержащий спейсера [4];

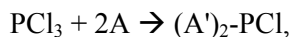
– (ФПС-2) – четырехфункциональный олигомер, спейсер введен эпоксидной смолой Э-181 [5];

– (ФПС-3) – четырехфункциональный олигомер, спейсер введен эпоксидной смолой ЭД-20 [6];

– (ФПС-4) – четырехфункциональный олигомер ФПС-3, в котором один фрагмент из четырех, образующихся в результате реакции ГМАК, заменен группой от реакции аллильного глицидилового производного [7].

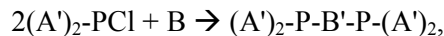
Трехфункциональное соединение получали путем взаимодействия трихлорида фосфора с глицидильными производными метакриловой кислоты в соотношении 1:3.

Четырехфункциональные олигомеры получали в две стадии. На первой стадии получали полупродукт по схеме:



где А – непредельный альфа оксид, А' – структура присоединения непредельного альфа оксида.

Синтез конечных соединений, содержащих спейсеры различного строения, получали взаимодействием полупродукта первой стадии с диэпоксидом по схеме:

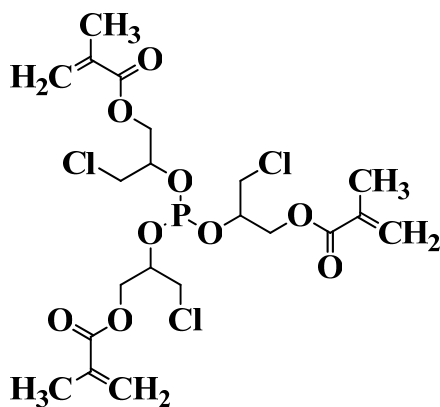


где В – диэпоксидные олигомеры, В' – структура присоединения диэпоксидных олигомеров.

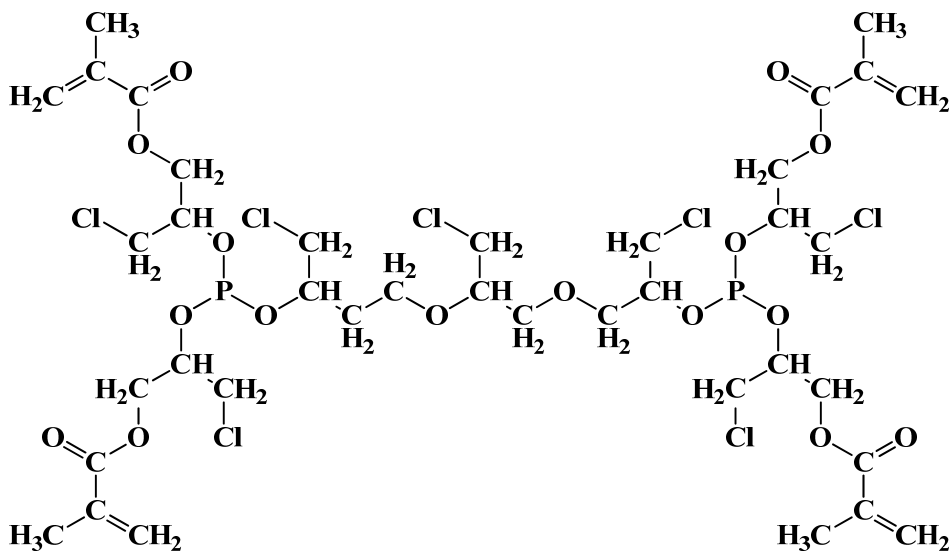
Структуры исследуемых соединений представлены ниже.

Все продукты представляли собой вязкие жидкости светло-желтого цвета, хорошо растворимые в ацетоне и хлороформе.

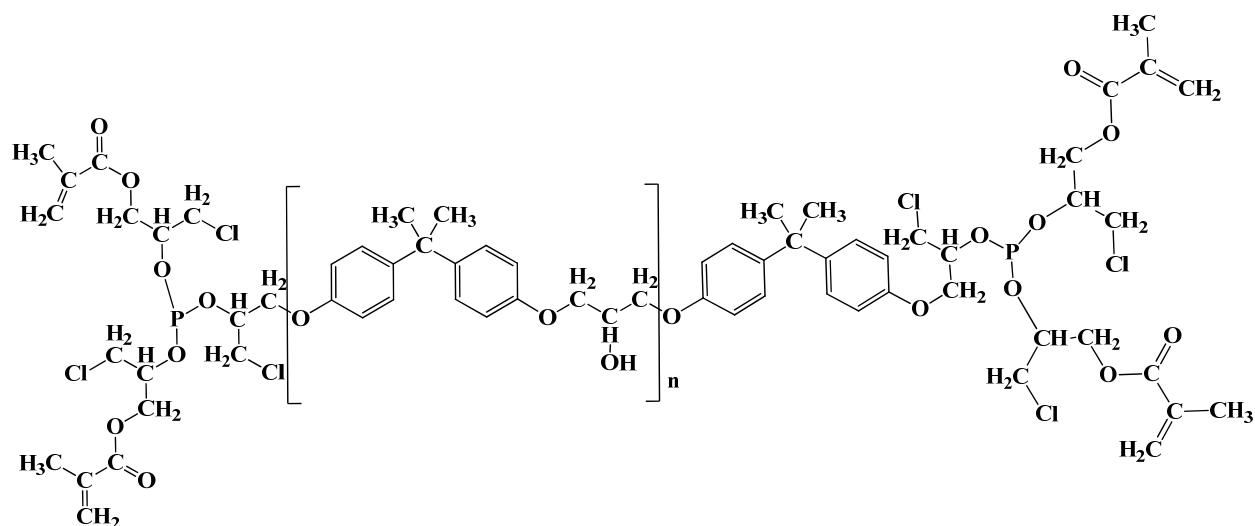
Продукты ФПС-1, ФПС-2, ФПС-3 и ФПС-4 использовали для получения светоотверждаемых композиций с целью оценки влияния спейсера на свойства отвержденного материала в присутствии инициатора бис(2,4,6-триметилбензоил)фенилфосфин-оксида.



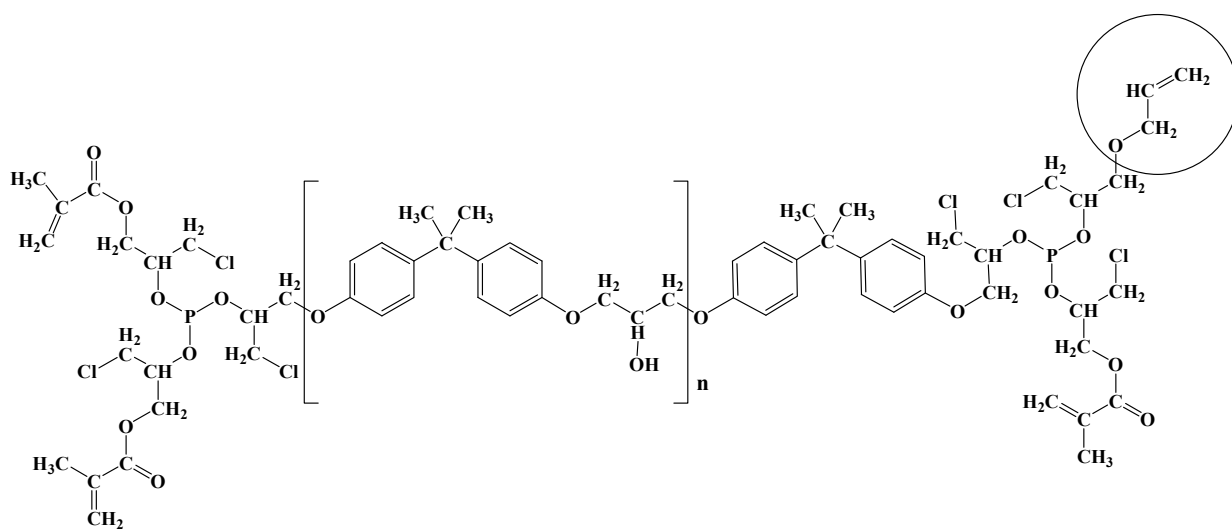
ФПС-1



ФПС-2



ФПС-3



ФПС-4

Особенности фотополимеризации изучали методом ДСК на приборе *Netzsch DSC 204F1 Phoenix* с фотоприставкой *Omniscure 2000S*. Измерения проводили в токе инертного газа (аргон, 90 мл/мин) в открытых алюминиевых тиглях при интенсивности излучения 1 Вт/см<sup>2</sup> и длительности экспозиции 300 с при 30 °С, использовали навески массой 20±2 мг. Кривую, характеризующую процесс фотополимеризации, получали вычитанием двух последовательно осуществленных эквивалентных сегментов засветки.

Динамику протекающих процессов отверждения реакционноспособных соединений в массе олигомера по принципу дифференциального реактора определяли с помощью сконструированной фотоячейки, предназначенной

для оценки изменения диэлектрических свойств реакционной смеси.

#### Обсуждение результатов

Отверждение синтезированных соединений пероксидными инициаторами (пероксид бензоила, пероксид дикумила) не привели к положительному результату, что, вероятно, связано с присутствием трехвалентного фосфора. В связи с этим дальнейшие исследования проводили под действием УФ-излучения в присутствии инициатора VArPhO, эффективного в широком диапазоне УФ-спектра, что отмечалось рядом авторов [8–10].

Результаты проведенных исследований методом ДСК представлены на рис. 1 и в таблице.

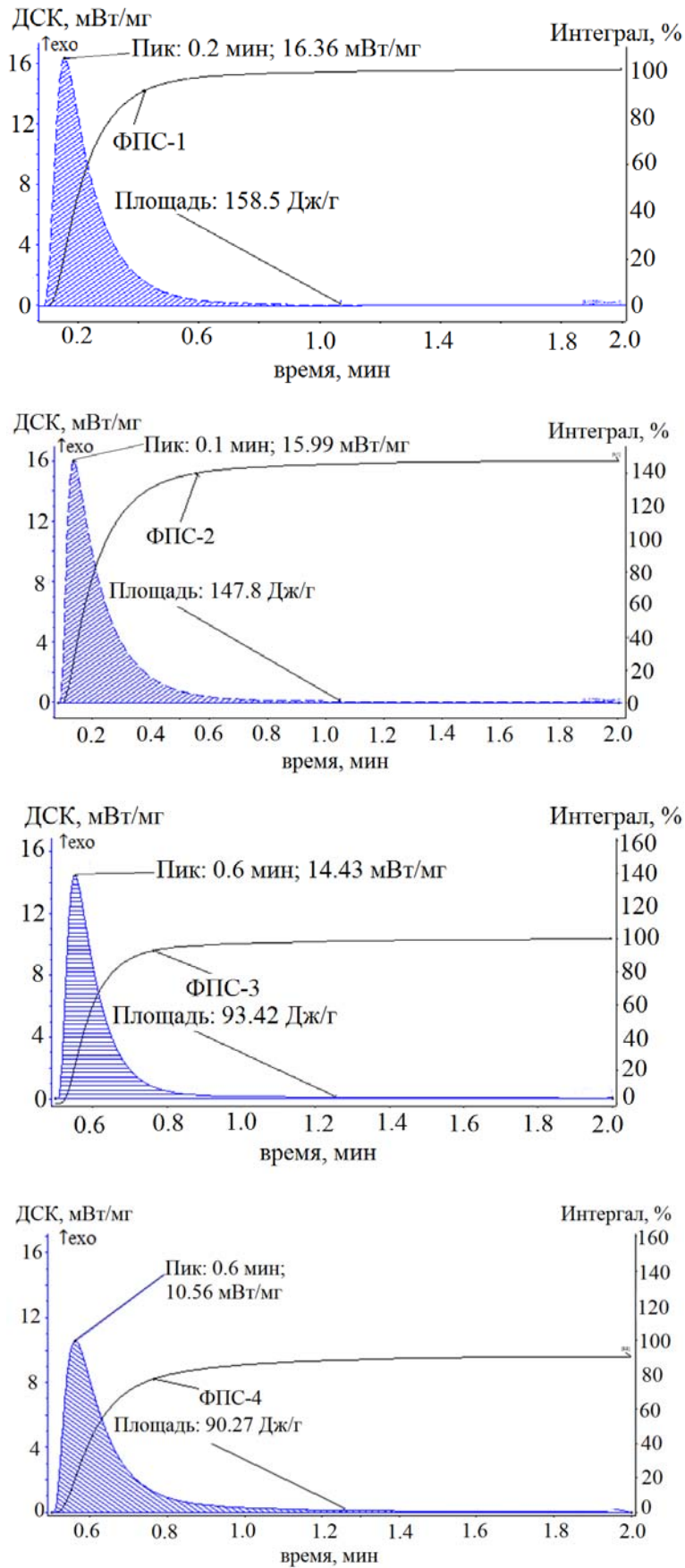


Рис. 1. Временные зависимости тепловых эффектов фотоотверждения ФПС-1, -2, -3 и -4

Из представленных данных (рис. 1) можно оценить влияние спейсера на тепловые эффекты процесса фотоотверждения. Введение спейсера алифатического строения (ФПС-2) оказывает малое влияние на величину пикового выделения тепла по сравнению тепловым эффектом беспейсерного трехфункционального ФПС-1, снижая его на 0,37 мВт/мг. Введение ароматического фрагмента (ФПС-3) оказывает большее влияние (понижение составило 1,93 мВт/мг), вероятно, за счет возникающих пространственных затруднений при полимеризации непредельных метакрилатных групп и эффекта разбавления.

Еще большее влияние оказывает замена одной метакрилатной на малореакционноспособную аллильную группу в олигомере, содержащем ароматический фрагмент (ФПС-4). Аналогичная тенденция снижения наблюдается при сопоставлении общего теплового эффекта процесса фотоотверждения. Максимальным тепловым эффектом (158,5 Дж/г) обладает не содер-

жащий спейсера ФПС-1. Введение алифатического и ароматического спейсеров приводит к уменьшению общего теплового эффекта процесса отверждения до 147,8 и 93,4 Дж/г, соответственно.

Учитывая, что введение спейсера при увеличении общей функциональности получаемого соединения снижает концентрацию полимеризационноспособных групп, по данным исследований ДСК была проведена оценка вклада одной метакрилатной группы в общий тепловой эффект брутто процесса отверждения синтезированных продуктов (см. табл.), которая составила 0,09376; 0,03113; 0,01822 Дж/(моль · экв) для ФПС-1, ФПС-2, ФПС-3, соответственно. Несколько большим значением приведенного теплового эффекта, по сравнению с ФПС-3, обладает ФПС-4, расчет для которого проводился с учетом трех функциональных метакрилатных групп. Полученный факт может быть объяснен частичным участием малореакционных аллильных групп в общем процессе фотоотверждения.

#### Экспериментальные данные

	Параметры	ФПС-1	ФПС-2	ФПС-3	ФПС-4
ДСК	$Q_{\max}$ , мВт/мг	16,36	15,99	14,43	10,56
	$Q_{\text{sum}}$ , Дж/г	158,5	147,8	93,4	90,3
	$Q_{\text{sum}}$ , Дж/моль	0,2813	0,1245	0,0729	0,0720
	$Q_{\text{sum}}$ , Дж/(моль·экв)	0,09376	0,03113	0,01822	0,0240
	Время при $Q_{\max}$ , мин	0,2	0,1	0,6	0,6
ДЭА	$\tau_{\text{инд}}$	50	1650	150	–
	$\tau_{0,9}$	1100	2050	1430	–
	$a=(\tau_{0,9}-\tau_{\text{инд}})$	1050	400	1280	–
	$1/a$ , с <sup>-1</sup>	$9,52 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-3}$	$7,81 \cdot 10^{-4}$	–

Дополнительно отверждение исследуемых соединений проводили в фотоячейке, работающей по принципу дифференциального реактора, с последующей оценкой протекающих процессов по изменению диэлектрических свойств во всем объеме вещества, в котором лишь часть материала переходила в отвержденное состояние.

Использование разработанной измерительной системы опиралось на известный факт [11, 12], что отвержденные полимеры обладают повышенными значениями диэлектрических свойств в связи с ограничением подвижности молекул в результате формирования межмолекулярных связей.

Для минимизирования тепловых потоков от УФ-источников фотоячейка была оснащена светодиодами с низкими характеристиками ИК-излучения. Сконструированная измерительная система позволяет оценивать изменение диэлектрических свойств материала ( $C_a$ ) под воздействием УФ излучения (397 нм) при интенсивности 0,0172 мВт/см<sup>2</sup>.

По полученным экспериментальным данным изменения диэлектрических свойств материалов как параметра структурообразования во времени под воздействием УФ-излучения была рассчитана степень завершенности процесса с использованием приведенного ниже метода расчета [13].

$$\beta = \frac{C_{ai} - C_{amin}}{C_{amax} - C_{amin}}$$

где  $C_{ai}$  – текущее значение показателя диэлектрических свойств ячейки;  $C_{amin}$  – минимальное значение показателя диэлектрических свойств ячейки;  $C_{amax}$  – максимальное значение показателя диэлектрических свойств ячейки.

Результаты расчетов представлены на рис. 2 и в таблице.

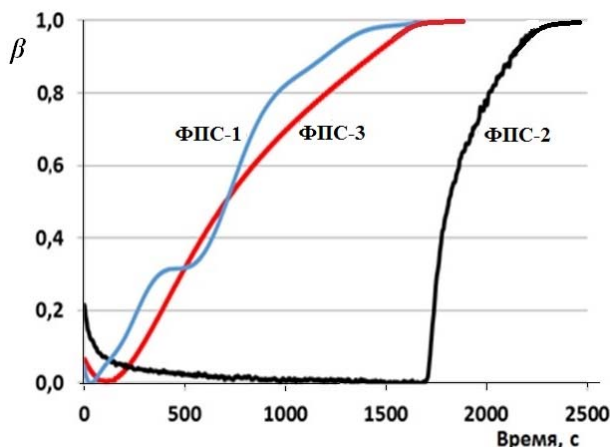


Рис. 2. Влияние времени УФ-облучения на степень завершенности процесса (ВАРfO 0,5 % мас.)

По результатам исследований в фотоячейке видно, что отверждение фосфорсодержащих соединений, не имеющих спейсера, протекает достаточно быстро (ФПС-1, рис. 2). На кривой имеется выраженный перегиб, характеризующий окончание процесса гелеобразования, после которого скорость структурирования увеличивается, переходя в заключительную фазу формирования структуры полимера.

Динамика отверждения продуктов со спейсерами различной структуры значительно отличается от процесса отверждения ФПС-1 и характеризуется, в том числе, отсутствием явно выраженного участка формирования геля.

Значительное ускорение процесса структурообразования для образца ФПС-2, содержащего алифатический «мягкий» спейсер, наблюдается после достаточно длительного индукционного периода. Это можно объяснить большей подвижностью макромолекул, формирующихся под действием УФ-излучения, благодаря «мягкому» спейсеру, обеспечивающему общую подвижность полимерных структур, образующихся в результате гомополимеризации метакрилатных фрагментов. Процесс формирования «жесткоштитого» полимера в этом случае про-

текает за более длительное время, со скоростью в основном периоде, сопоставимой скорости соединений без спейсера (ФПС-1). Дополнительно выделяющееся в результате полимеризации тепло может также обеспечивать подвижность полимеризующегося материала, что увеличивает молекулярную подвижность, приводя к увеличению индукционного периода. Однако тепловыделение фиксируется для всех исследуемых объектов, что проявляется в понижении показаний диэлектрических характеристик на начальном этапе.

Процесс фотоотверждения ФПС-3, содержащего малоподвижный спейсер остатка эпоксиолигомера ЭД-20, в структуру которого входят связанные бензольные кольца, характеризуется малыми временами индукционного периода. Однако в этом случае не наблюдается явно выраженного процесса гелеобразования, вероятно затеняемого ограничением подвижности растущих структур реакционноспособных центров за счет их связывания спейсером.

#### Заключение

Таким образом, в ходе проведенных исследований показано влияние спейсера в химической структуре соединения на скорость отверждения олигомеров под действием УФ-излучения. Введение спейсера в структуру олигомера сопровождается увеличением индукционного периода отверждения ФПС-3 в 4 раза, а ФПС-2 в 39 раз по сравнению с образцом, не содержащим спейсера (ФПС-1). ДСК исследованиями установлено, что максимальным тепловым эффектом УФ-отверждения (158,5 Дж/г) обладает олигомер, не содержащий спейсера (ФПС-1). Введение спейсеров алифатического и ароматического строения приводит к уменьшению общего теплового эффекта процесса отверждения до 147,8 и 93,4 Дж/г, соответственно.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Morphology, optical properties, and curing behavior of UV-curable acrylate-siloxane polymer blends / Zareanshahraki, F., Jannesari, A., Rastegar, S // Polymer Testing. – 2020. Vol. 85. N 106412.
2. Влияние вязкости композиций на основе диметакриловых эфиров на кинетику их фотополимеризации, инициируемой 9,10-фенантренином / М. Ю. Захарина и др. // Высокомолекулярные соединения. – Серия Б. – 2018. – Т. 60, № 6. – С. 446–454.
3. Берлин, А. А. Акриловые олигомеры и материалы на их основе / А. А. Берлин, Г. В. Королев, Т. Я. Кефели, Ю. М. Сивергин. – М.: Химия, 1983. – 232 с.: ил.
4. Пат. 2697721 Российская Федерация, МПК C07F9/141, C08G79/04 Способ получения термо- и тепло-

стойких полимеров на основе трис-[(1-галогенметил-2-метакрилокси)этокси] фосфинов / О. И. Тужиков, О. О. Тужиков, Б. А. Буравов, Е. С. Бочкарев, К. В. Солодовникова, Т. В. Хохлова, Н. В. Сидоренко, Али Худхаир Джаббар Аль-Хамзави; ВолгГТУ. – 2019.

5. Пат. 2712107 Российская Федерация, МПК C08G79/04, C08F279/06, C07F9/00 Применение олигоэфиракрилата (((4-((1-(2-((бис((1-галоген-3-(метакрилоилокси)пропан-2-ил) окси)фосфин) окси)-3-галогенпропокси)-3-хлорпропан-2-ил) окси)-1-галогенбутан-2-ил) окси)фосфиндиил)бис (окси)бис(3-галогенпропан-2,1-диил)бис(2-метакрилата) в качестве мономера для получения термо- и теплостойких полимеров с пониженной горючестью / О. И. Тужиков, О. О. Тужиков, Б. А. Буравов, Е. С. Бочкарев, К. В. Солодовникова, Т. В. Хохлова, Н. В. Сидоренко, Али Худхаир Джаббар Аль-Хамзави; ФГБОУ ВО ВолгГТУ. – 2020.

6. Пат. 2712116 Российская Федерация, МПК C07F9/141, C08G79/04 Применение олигоэфиракрилата (((((((((2-гидроксипропан-1,3-диил) бис (окси) бис (4,1-фенилен)) бис (пропан-2,2-диил) бис (4,1-фенилен)) бис (окси) бис (1-галогенпропан-3,2-диил) бис (окси) бис (фосфинтриил) тетракис (окси) тетракис (3-галогенпропан-2,1-диил) тетракис (2-метилакрилата) в качестве мономера для получения термо- и теплостойких полимеров с пониженной горючестью / О. И. Тужиков, О. О. Тужиков, Б. А. Буравов, Е. С. Бочкарев, К. В. Солодовникова, Т. В. Хохлова, Н. В. Сидоренко, Али Худхаир Джаббар Аль-Хамзави; ФГБОУ ВО ВолгГТУ. – 2020.

7. Пат. 2712119 Российская Федерация, МПК C07F9/00, C08L85/02 Применение олигоэфиракрилата (((1-(4-(2-(4-(3-(4-(2-(4-(2-(((1-(аллилокси)-3-галогенпропан-2-ил) окси) ((1-галоген-3-(метакрилоилокси) пропан-2-ил) окси) фосфин) окси)-3-галогенпропокси) фенил) пропан-2-ил) фенокси)-2-гидроксипропокси) фенил) пропан-2-ил) фенокси)-3-галогенпропан-2-ил) окси) фосфиндиил) бис (окси) бис (3-галогенпропан-2,1-диил) бис (2-метилакрилат) в качестве мономера для получения термо- и теплостойких полимеров с пониженной горючестью / О. И. Тужиков, О. О. Тужиков, Б. А. Буравов, Е. С. Бочкарев, Т. В. Хохлова, Н. В. Сидоренко; ФГБОУ ВО ВолгГТУ. – 2020.

8. Increased rates of photopolymerisation by ternary type II photoinitiator systems in dental resins / Lima, A.F. [et al.] // Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials. – 2019. V. 98. P. 71-78.

9. Novel carbazole skeleton-based photoinitiators for led polymerization and LED projector 3D printing / Mousawi, A.A. [et al.] // Molecules. – 2017. V. 22, Is. 12. N 2143.

10. UV initiated formation of polymer monoliths in glass and polymer microreactors / Deverell, J.A. [et al.] // Sensors and Actuators, B: Chemical. – 2011. V. 155, Is. 1. P. 388-396.

11. Иржак, В. И. Кинетика отверждения олигомеров / В. И. Иржак, С. М. Межиковский // Успехи химии. – 2008. – Т. 77, № 1. – С. 78-104.

12. Иржак, В. И. Химическая физика отверждения олигомеров : монография / В. И. Иржак, С. М. Межиковский ; отв. ред. А. Е. Чалых. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Издательство Юрайт, 2019. – 276 с.

13. Влияние растворенных ПВХ и сополимера А-15-О в эпоксидном связующем на физико-механические свойства и огнестойкость наполненных гидроксосиликатами отвержденных полимерных систем / О. О. Тужиков, Б. А. Буравов, Е. С. Бочкарев, В. Е. Аввакумов, Н. В. Сидоренко, Я. П. Кузнецов, Д. Ндильбэ, О. И. Тужиков // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 12 (222) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2018. – С. 106-113.

## REFERENCES

1. Morphology, optical properties, and curing behavior of UV-curable acrylate-siloxane polymer blends / Zareanshahraki, F., Jannesari, A., Rastegar, S // Polymer Testing. – 2020. Vol. 85. N 106412.

2. Vliyanie vyazkosti kompozicij na osnove dimetakrilovyh efirov na kinetiku ih fotopolimerizacii, iniciiruemoj 9,10-fenantrenhinonom / M. YU. Zaharina i dr. // Vysokomolekulyarnye soedineniya. Seriya B, 2018, tom 60, № 6, s. 446-454.

3. Akrilovye oligomery i materialy na ih osnove / Berlin A.A., Korolev G.V., Kefeli T.YA., Sivergin YU.M. // Himiya. - M. 1983. – 232 s.: il.

4. Pat. 2697721 Rossijskaya Federaciya, MPK C07F9/141, C08G79/04 Sposob polucheniya termo- i teplostojkikh polimerov na osnove tris-[(1-galogenmetil-2-metakriloksi)etoksi] fosfinov / O. I. Tuzhikov, O. O. Tuzhikov, B. A. Buravov, E. S. Bochkarev, K. V. Solodovnikova, T. V. Hohlova, N. V. Sidorenko, Ali Hudhair Dzhabbar Al'-Hamzavi; VolgGTU. - 2019.

5. Pat. 2712107 Rossijskaya Federaciya, MPK C08G79/04, C08F279/06, C07F9/00 Primenenie oligoefirakrilata (((4-((1-(2-((bis((1-galogen-3-(metakriloiloksi)propan-2-il) oksi)fosfin) oksi)-3-galogenpropoksi)-3-hlorpropan-2-il) oksi)-1-galogenbutan-2-il) oksi)fosfindiil)bis (oksi)bis(3-galogenpropan-2,1-diil)bis(2-metakrilata) v kachestve monomera dlya polucheniya termo- i teplostojkikh polimerov s ponizhennoj goryuchest'yu / O. I. Tuzhikov, O.O. Tuzhikov, B.A. Buravov, E.S. Bochkarev, K.V. Solodovnikova, T.V. Hohlova, N.V. Sidorenko, Ali Hudhair Dzhabbar Al'-Hamzavi; FGBOU VO VolgGTU. - 2020.

6. Pat. 2712116 Rossijskaya Federaciya, MPK C07F9/141, C08G79/04 Primenenie oligoefirakrilata (((((((((2-gidroksipropan-1,3-diil) bis (oksi) bis (4,1-fenilen)) bis (propan-2,2-diil) bis (4,1-fenilen)) bis (oksi) bis (1-galogenpropan-3,2-diil) bis (oksi) bis (fosfintriil) tetakis (oksi)) tetakis (3-galogenpropan-2,1-diil) tetakis (2-metilakrilata) v kachestve monomera dlya polucheniya termo- i teplostojkikh polimerov s ponizhennoj goryuchest'yu / O. I. Tuzhikov, O. O. Tuzhikov, B. A. Buravov, E. S. Bochkarev, K. V. Solodovnikova, T. V. Hohlova, N. V. Sidorenko, Ali Hudhair Dzhabbar Al'-Hamzavi; FGBOU VO VolgGTU. - 2020.

7. Pat. 2712119 Rossijskaya Federaciya, MPK C07F9/00, C08L85/02 Primenenie oligoefirakrilata (((1-(4-(2-(4-(3-(4-(2-(4-(2-(((1-(alliloksi)-3-galogenpropan-2-il) oksi) ((1-galogen-3-(metakriloiloksi) propan-2-il) oksi) fosfin) oksi)-3-galogenpropoksi) fenil) propan-2-il) fenoksi)-2-gidroksipropoksi) fenil) propan-2-il) fenoksi)-3-galogenpropan-2-il) oksi) fosfindiil) bis (oksi) bis (3-galogenpropan-2,1-diil) bis (2-metilakrilat) v kachestve monomera dlya polucheniya termo- i teplostojkikh polimerov s ponizhennoj goryuchest'yu / O. I. Tuzhikov, O. O. Tuzhikov, B. A. Buravov, E. S. Bochkarev, T. V. Hohlova, N. V. Sidorenko; FGBOU VO VolgGTU. - 2020.

8. Increased rates of photopolymerisation by ternary type II photoinitiator systems in dental resins / Lima, A.F. [et al.] // Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials. – 2019. V. 98. P. 71-78.

9. Novel carbazole skeleton-based photoinitiators for led polymerization and LED projector 3D printing / Mousawi, A.A. [et al.] // Molecules. – 2017. V. 22, Is. 12. N 2143.

10. UV initiated formation of polymer monoliths in glass and polymer microreactors / Deverell, J.A. [et al.] // Sensors and Actuators, B: Chemical. – 2011. V. 155, Is. 1. P. 388-396.

11. Kinetika otverzheniya oligomerov / Irzhak V.I., Mezhevikovskij S.M. // Uspekhi himii. M. – 2008. T. 77, № 1. S: 78-104.

12. *Irzhak, V. I.* Himicheskaya fizika otverzheniya oligomerov : monografiya / V. I. Irzhak, S. M. Mezhevikskij ; otvetstvennyj redaktor A. E. CHalyh. – 2-e izd., pererab. i dop. – Moskva: Izdatel'stvo YUrajt, 2019. – 276 s.

13. Vliyanie rastvoryonnyh PVH i sopolimera A-15-O v epoksidnom svyazuyushchem na fiziko-mekhanicheskie svojs-

tva i ognestojkost' napolnennyh gidroksosilikatami otverzhdennyh polimernyh sistem / O.O. Tuzhikov, B.A. Buravov, E.S. Bochkarev, V.E. Avvakumov, N.V. Sidorenko, YA.P. Kuznecov, D. Ndil'be, O.I. Tuzhikov // Izvestiya VolgGTU. - Volgograd, 2018. - № 12 (222) Noyabr'. - С. 106-113.

*B. A. Buravov, E. S. Bochkarev, A. Al-Khamzawi, N. V. Sidorenko, O. O. Tuzhikov, O. I. Tuzhikov*

**STUDY OF THE INFLUENCE OF SPACER ON FEATURES OF UV CURING  
OF PHOSPHOROSE-CONTAINING METACRYLATES OF VARIOUS FUNCTIONALITY**

**Volgograd State Technical University**

**Abstract.** The article presents the results of studies of the features of photorecovery of trifunctional and tetrafunctional phosphorus-containing methacrylates with various spacers in the structure. It was found by differential scanning calorimetry that the introduction of spacers leads to a decrease in the overall thermal effect of the UV-curing process in comparison with a spacerless sample.

With the help of a photocell for an E7-25 immittance meter, which is capable of recording changes in dielectric properties over time, the influence of the spacer and its structure on the degree of completion of the UV-curing process was determined. The effect of the introduced spacer on the formation of a crosslinked polymer is shown, which is manifested by different times of the induction period.

**Keywords:** synthesis, glycidyl methacrylate, phosphorus trichloride, phosphorus-containing methacrylates, spacer, UV-curing, conversion, DSC, dielectric properties.