

Эпоксизамещенные винилоксициклопропаны в качестве антимикробных модификаторов эпоксидных смол

Epoxysubstituted vinylloxycyclopropanes as antimicrobial modifiers of epoxy resins

P.З. ШАХНАЗАРЛИ

R.Z. SHAHNAZARLI

Институт полимерных материалов Министерства науки и образования Азербайджанской республики, г. Сумгайыт, Азербайджан
Institute of Polymer Materials, Ministry of Science and Education of the Republic of Azerbaijan, Sumgayit, Azerbaijan
shahnazarli@mail.ru

Синтезированы глицидилоксикарбонил- и глицидилоксиметил-циклопропилвиниловые эфиры, которые испытаны в качестве разбавителей и антимикробных модификаторов эпоксидной смолы ЭД-20. Синтезированные эфиры хорошо совмещаются со смолой ЭД-20, а введение их в состав смолы в количестве 5–20 масс.% вызывает значительное снижение вязкости системы. Изучены прочностные и термические свойства отвержденных малеиновым ангидридом композиций с участием синтезированных эфиров. Выявлено повышение теплостойкости и прочностных показателей композиций. *Ключевые слова:* винилоксициклопропан, эпоксидный олигомер, эпоксидная композиция, антимикробный модификатор, разбавитель

Glycidylloxycarbonyl and glycidylloxymethylcyclopropylvinyl ethers have been synthesized and tested as diluents and antimicrobial modifiers for ED-20 epoxy resin. The synthesized ethers are well compatible with ED-20 resin, and their introduction into the resin in an amount of 5–20 mass.% causes a considerable decrease in the viscosity of the system. The strength and thermal properties of maleic anhydride-cured compositions containing synthesized esters were studied. An increase of heat resistance and strength properties of the compositions has been revealed.

Keywords: vinylloxycyclopropane, epoxy oligomer, epoxy composition, antimicrobial modifier, diluent

DOI: 10.35164/0554-2901-2025-02-28-31

Введение

Эпоксидные олигомеры (ЭО) – одни из наиболее востребованных в настоящее время классов термореактивных высокомолекулярных соединений. Они обладают уникальными свойствами, благодаря которым нашли широкое применение в различных отраслях техники: в качестве конструкционных клеев и поверхностных покрытий, в лакокрасочной промышленности для повышения устойчивости материалов к коррозии, а также для создания различных инженерных композитов [1–5]. ЭО отличаются малой усадкой при отверждении, а при правильном выборе отвердителя легко регулировать степень их отверждения. Недостатком ЭО является их высокая вязкость. Многофункциональные соединения, содержащие эпоксидные и другие реакционноспособные группы, часто применяют в качестве активных разбавителей эпоксидных смол, которые при отверждении входят в состав образующейся сетчатой структуры [6, 7]. Например, простые виниловые эфиры, содержащие, помимо активной винилокси группы, другие реакционноспособные функциональные группы (гидроксильную, аминную, оксиановую, тирановую, диоксолановую и др.), часто используют при создании самосшивающихся и самоотверждающихся полимерных покрытий [8, 9]. Так, винилглицидиловые эфиры гликолей зарекомендовали себя как активные мономеры для получения технически ценных олигомеров и материалов на их основе с заданным комплексом свойств (прочностью, термостабильностью, пластичностью, адгезией и т.д.) [10–12]. Эпоксидная группа в этих соединениях характеризуется высокой реакционной способностью, и в процессе отверждения эти соединения формируют прочные химические связи с молекулами смолы [13]. Еще одним недостатком ЭО является то, что готовые изделия и покрытия на их основе подвергаются биологическому повреждению различными микроорганизмами. Загрязнение микроорганизмами и грибами поверхности полимерных изделий из

эпоксидных композиций в процессе эксплуатации приводит к сокращению срока их службы. Для улучшения антимикробных свойств эпоксидные смолы модифицируют введением в состав композиций специальных противомикробных агентов, таких как наночастицы серебра, меди, оксиды некоторых металлов (ZnO, TiO₂, CuO), модифицированные наноглины, биоцидные полимеры, а также растительные масла и соединения, полученные из растительных экстрактов, обладающие антибактериальной активностью [14–17]. Существуют различные способы модификации ЭО для придания им антимикробных свойств: прививка антимикробного агента к поверхности полимера с помощью так называемых линкеров, осуществление поверхностных реакций для образования антимикробной пленки, физическая адсорбция антимикробного вещества за счет образования нековалентных или электростатических взаимодействий, введение антимикробных соединений в матрицу смолы [18, 19]. Одним из привлекательных методов модификации свойств ЭО является введение в состав эпоксидных композиций антимикробных соединений, одновременно улучшающих и текучесть смолы. При этом очень важно сохранение прочностных и других свойств композиций.

С целью улучшения антимикробных свойств отвержденных эпоксидных композиций в представленной работе осуществлена модификация эпоксидной смолы ЭД-20 эпоксизамещенными винилоксициклопропанами (ВОЦП).

Экспериментальная часть

Для исследования выбрана смола ЭД-20 (эпоксидное число 22; динамическая вязкость 21,5 Па·с). Отвердитель – малеиновый ангидрид (МА) ($T_{пл}$ 52°C; плотность 1,474 г/см³). Эпоксидные композиции готовили смешением смолы ЭД-20 с эпоксизамещенными винилоксициклопропанами (в количестве 5–20 масс.%), затем к смеси добавляли рассчитанное количество отвердителя. Далее смесь нагревали до 60°C в течение 10 минут для достижения

однородности, дегазировали в вакууме, затем выливали в тефлоновую форму. Отверждение композиций осуществляли в следующем режиме: 10 ч при комнатной температуре, 2 ч при 60°C, 2 ч при 80°C и 2 ч при 120°C.

ИК-спектры исходных соединений и полученных композиций регистрировали на ИК-Фурье спектрофотометре ALPHA фирмы Bruker (Германия) в диапазоне волновых чисел 600–4000 см⁻¹ с кристаллом ZnSe.

Измерение динамической вязкости проводили на цифровом ротационном вискозиметре РВЦ-90РИ (Россия) со скоростью вращения измерительного цилиндра 1 об/мин при температуре 298 К.

Термогравиметрический анализ выполняли на дериватографе фирмы MOM «Паулик-Паулик-Эрдей» (Венгрия) [20]. Навеска образца 200 мг. Чувствительность каналов: ТГ – 200 мкВ, ДТА – 250 мкВ, ДТГ – 1 мВ, скорость нагрева – 5 град/мин на воздухе.

Прочность при разрыве (σ) и относительное удлинение при разрыве (ϵ) определяли по ГОСТ 14236-81 при скорости движения захвата 10 мм/мин.

Исследование антимикробных свойств отвержденных композиций осуществляли методом диффузии в агар. В качестве тестов использовали штаммы грамположительных (*Staphylococcus aureus*) и грамотрицательных (*Escherichia Coli*) бактерий, которые были выращены в аэробных условиях в жидком бульоне при 37°C в течение 48 часов. Образцы композиций в форме дисков диаметром 6 мм помещали в чашки Петри, покрытые агаром и инокулированные раствором бактерий, планшеты инкубировали при 37°C в течение 24 часов. По истечении этого периода замеряли зону ингибирования (от края диска до конца зоны ингибирования) образцом роста бактерий.

Противогрибковую активность отвержденных композиций исследовали на спорах грибов *Aspergillus niger* и *Candida albicans* [21]. Исследования проводили методом диффузии в агар в чашках Петри диаметром 90 мм. Образцы композиций диаметром 6 мм вносили в лунки на засеянной спорами грибов чашке с агаром, при этом грибной диск располагали между тестируемыми образцами в центре чашки. Расстояние от диска гриба до края образцов фиксировали на уровне 15 мм. Образцы инкубировали при 30°C в течение семи дней, после чего замеряли зону задержки роста грибов на образцах композиций.

Результаты и их обсуждение

Синтез соединений 2 и 3 был осуществлен по схеме (рис. 1) из винилоксициклопропан-карбоновой кислоты (1а) и винилоксициклопропил-карбинола (1б), синтезированных из этоксикарбонил замещенного циклопропилвинилового эфира 1 [22, 23].

Синтезированные соединения имели физические характеристики, представленные в таблице 1.

Структура синтезированных эпокси содержащих ВОЦП 2 и 3 подтверждена данными элементного анализа и ИК спектроскопией. В ИК-спектрах соединений имеются полосы поглощения, характерные для эпоксидного цикла (915, 1250, 3010 см⁻¹), циклопропановой группы (1040–1045 см⁻¹), карбонильной группы соединения 2

(1720–1730 см⁻¹), простой эфирной связи –С–О–С– (1050–1110 см⁻¹), а также полосы поглощения С–Н-связей (2870–2930 см⁻¹).

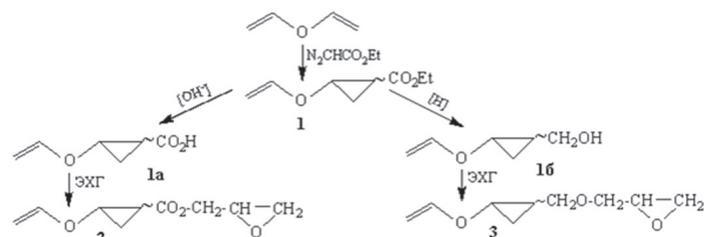


Рис. 1. Схема синтеза соединений 2 и 3.

Синтезированные соединения 2 и 3 вводили в состав смолы ЭД-20 в количестве от 5 до 20 масс.%. Исследование вязкостных характеристик компаундов показало, что соединения хорошо совмещаются с эпоксидной смолой и уменьшают ее вязкость. Введение этих соединений в состав смолы ЭД-20 в количестве от 5 до 10 масс.% приводит к резкому снижению относительной вязкости композиции в 1,52–2,5 раза (для соединения 2) и в 1,37–2,0 раза (для соединения 3) (рис. 2). При дальнейшем увеличении содержания соединений в композиции до 20 масс.% их относительные вязкости снижаются в 4,3 и 2,9 раза соответственно. Различия в структуре соединений 2 и 3 не оказывают большого влияния на эффективность разбавления.

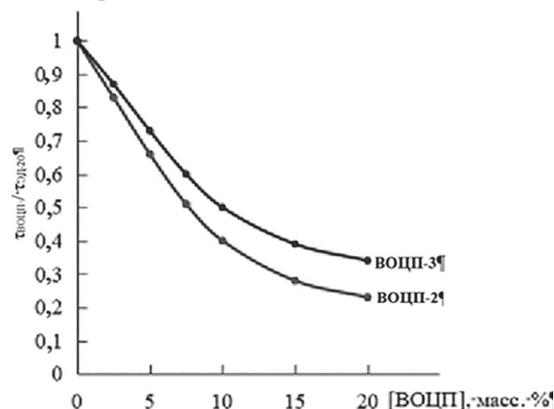


Рис. 2. Зависимость относительной вязкости композиций на основе ЭД-20 от содержания модификатора [ВОЦП].

Синтезированные эпокси замещенные винилоксициклопропаны (ВОЦП), как было выявлено ранее, могут быть использованы в качестве реакционноспособных олигомеров, поскольку они легко участвуют в реакции отверждения с аминными и ангидридными отвердителями, образуя при этом структурированные компаунды с улучшенными прочностными и теплофизическими показателями [22]. Эпоксидные и циклопропановые группы, присутствующие в структуре синтезированных мономеров, придают этим соединениям выраженную биологическую активность [24]. В связи с этим рассмотрена возможность применения синтезированных глицидилоксикарбонил- (2) и глицидилоксиметил- (3) замещенных

Таблица 1. Некоторые физические характеристики соединений 2 и 3.

ВОЦП	Брутто-формула	ММ, а.е.м.	$T_{\text{кип}}$, °С/мм	n_D^{20}	d_4^{20}	Вязкость, Па·с	Эпоксидное число*, %	
							вычисл. / найд.	
2	C ₉ H ₁₂ O ₄	184	110/4	1,4361	1,0786	1,26·10 ⁻³	31,00 / 30,78	
3	C ₉ H ₁₄ O ₃	170	85–87/4	1,4493	1,0310	1,18·10 ⁻³	33,53 / 33,32	

* – в расчете на пропиленоксидную группу.

Таблица 2. Физико-механические и термические показатели отвержденных эпоксидных композиций (количество отвердителя (МА) – 55 масс.%)^{*}.

Композиция на основе ЭД-20 + ВОЦП	Кол-во разбавителя, масс. %	Предел прочности при разрыве, МПа	Предел прочности при изгибе, МПа	Относит. удлинение при разрыве, %	Теплостойкость по Вика, С	Твердость по Бринеллю, МПа
ЭД-20	0	39	42	2,0	134	1,30
ВОЦП-2	5	81	64	4,5	154	1,11
	20	102	44	5,3	113	0,91
ВОЦП-3	5	76	67	4,8	144	1,15
	20	109	45	5,8	117	1,07

* приведены среднearифметические значения показателей по результатам испытаний 3–5 образцов.

Таблица 3. Величина зоны ингибирования (мм) роста бактерий образцами композиций на основе ЭД-20 в зависимости от содержания модификатора (через 24 ч инкубирования).

Композиция на основе	Величина зоны ингибирования (мм) при содержании модификатора эпокси-ВОЦП (масс. %)							
	5				10			
	5	10	15	20	5	10	15	20
	<i>Escherichia Coli</i>				<i>Staphylococcus aureus</i>			
ЭД-20 + ВОЦП-2	3,3±0,1	4,1±0,2	5,3±0,3	6,1±0,2	2,2±0,1	2,9±0,3	4,0±0,2	4,7±0,3
ЭД-20 + ВОЦП-3	2,1±0,1	3,9±0,1	4,9±0,3	5,8±0,4	1,8±0,1	2,1±0,1	3,1±0,2	3,6±0,3

Таблица 4. Зона ингибирования роста грибов (мм) *Aspergillus niger* и *Candida albicans* образцами композиций на основе ЭД-20 и соединений 2 и 3.

Образец	Величина зоны ингибирования (мм) при содержании модификатора эпокси-ВОЦП (масс.%)							
	5				10			
	5	10	15	20	5	10	15	20
	<i>Aspergillus niger</i>				<i>Candida albicans</i>			
ЭД-20	1±0,1*				2±0,1*			
ЭД-20 + эпокси-ВОЦП-2	3±0,4	7±0,7	11±0,8	13±0,6	4±0,5	8±0,8	12±0,9	15±0,8
ЭД-20 + эпокси-ВОЦП-3	3±0,1	6±0,2	8±0,3	12±0,2	3±0,4	5±0,4	8±0,6	11±0,8

* – расстояние в мм от края образца до границы роста.

винилоксициклопропанов в качестве активных разбавителей-модификаторов, придающих эпоксидной смоле ЭД-20 антимикробные свойства. Подобран оптимальный режим отверждения изготовленных компаундов. Отверждение осуществляли малеиновым ангидридом (МА) при повышенных температурах в следующем режиме: 10 ч при комнатной температуре, 6 ч при 60°C, 6 ч при 80°C и 2 ч при 120°C. Как показали спектральные исследования, соединения 2 и 3 легко участвуют в реакции отверждения, образуя сетчатую структуру по предложенной схеме (рис. 3).

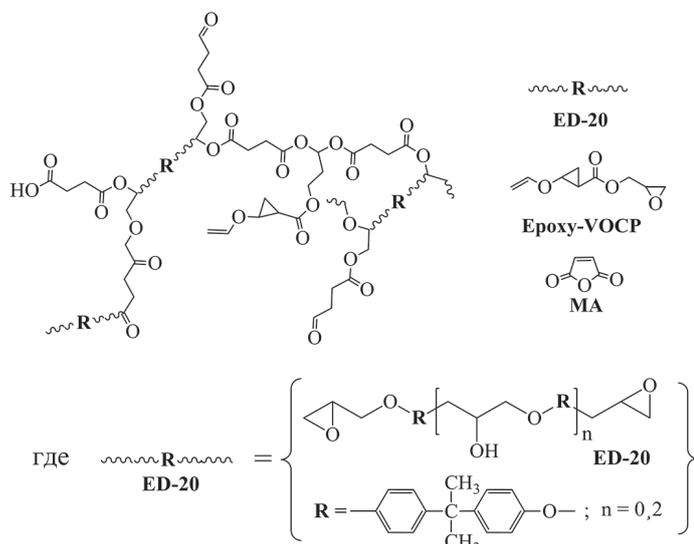


Рис. 3. Схема реакции отверждения с участием соединений ВОЦП-2 и ВОЦП-3.

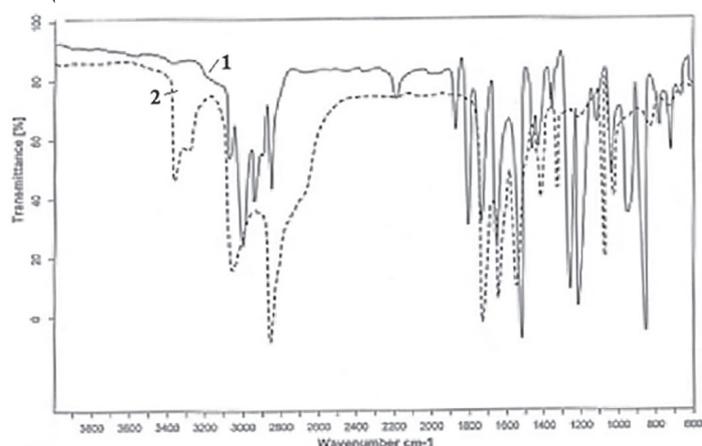


Рис. 4. ИК спектры композиций на основе эпоксидного олигомера ЭД-20 с модификатором (содержание ВОЦП-2 – 20 масс.%): 1 – до отверждения, 2 – после отверждения малеиновым ангидридом.

В ИК спектрах структурированных компаундов (рис. 4) наблюдается исчезновение полос поглощения при 915, 1250 и 3010 см⁻¹, характерных для эпоксидного кольца. Выбранный режим отверждения позволяет сохранить циклопропановый фрагмент неза-

тронутом, однако характеристические полосы поглощения, приписываемые циклопропану (полосы при ~1030 см⁻¹), сливаются с полосами поглощения простых эфирных связей. В спектрах отвержденных образцов присутствуют полосы при 1734 и 1050 см⁻¹, относящиеся к группам –С=О и –СОО– сложноэфирных звеньев, широкая полоса поглощения с максимумом при 3390 см⁻¹, принадлежащая валентным колебаниям –ОН-группы, полученной при раскрытии эпоксидного кольца, а также полоса при 2850 см⁻¹, приписываемая валентным колебаниям –СН– группы.

Были изучены прочностные и термические свойства отвержденных малеиновым ангидридом композиций на основе ЭД-20 с добавлением соединений 2 и 3 (табл. 2). Из данных таблицы следует, что отвержденные компаунды с модификатором имеют улучшенные прочностные и теплофизические показатели по сравнению с отвержденной смолой ЭД-20 без модификатора.

Характерной особенностью синтезированных эпоксизамещенных ВОЦП является то, что в их структуре, наряду с реакционноспособными эпоксидными циклами, содержатся также циклопропановые группы, которые, в силу своей специфичности, придают соединениям биологическую активность [24]. Подобные соединения могут усиливать антимикробные свойства изготовленных материалов. Для улучшения антимикробных свойств эпоксидных композиций на основе ЭД-20 синтезированные соединения были введены в состав композиций в количестве 5–20 масс.%. Исследование антимикробных свойств отвержденных композиций проводили на штаммах грамположительных (*Staphylococcus aureus*) и грамотрицательных (*Escherichia Coli*) бактерий методом диффузии в агар. Было выявлено, что в отличие от чистой эпоксидной смолы ЭД-20, образцы модифицированных композиций проявляли антимикробную активность по отношению как *S.aureus*, так и *E.Coli*, причем ингибирование роста бактерий *S.aureus* соединением 2 было заметным уже при концентрации 5 масс.% (табл. 3).

Наибольшим ингибирующим действием обладали образцы с содержанием модификатора 20 масс.%. Большая антимикробная активность соединения 2 по сравнению с соединением 3, возможно, связана с наличием в его структуре, помимо циклопропановой, также реакционноспособной карбонильной группы. Модифицированные композиции также показали большую активность против грамотрицательной *Escherichia Coli*, что, возможно, связано с более сложным строением клеточной стенки грамположительной *Staphylococcus aureus*.

Исследования показали, что в отличие от чистой эпоксидной смолы, образцы модифицированных композиций продемонстрировали антигрибковую активность по отношению к грибкам *Aspergillus niger* и *Candida albicans*. Максимальное ингибирующее действие показали образцы с содержанием 20 масс.%. По истечении 7 дней инокуляции колонии грибов дорастали до края образца композиции на расстоянии 13 и 15 мм соответственно (табл. 4).

Выводы

Синтезированы глицидилоксикарбонил- и глицидилоксиметилзамещенные циклопропилвиниловые эфиры. Введение их в состав композиций на базе эпоксидной смолы ЭД-20 в качестве активных

разбавителей способствовало эффективному снижению вязкости смолы. Структурные особенности синтезированных эпоксисодержащих винилоксициклопропанов указывают на участие их в реакции отверждения с малеиновым ангидридом. Подобран оптимальный режим отверждения изготовленных компаундов. Показано, что при отверждении компаундов на основе эпоксидной смолы ЭД-20 с добавлением синтезированных эпоксисодержащих винилоксициклопропанов получают прочные и термически устойчивые композиции, обладающие также антимикробной активностью. Образцы модифицированных эпоксисодержащими винилоксициклопропанами композиций эффективно подавляли рост грибов *Aspergillus niger* и *Candida albicans*. Композиции также показали активность против бактерий *Staphylococcus aureus* и *Escherichia Coli*, что позволяет использовать их в качестве антимикробных покрытий.

Литература

1. Wei H., Xia J., Zhou W., Zhou L., Hussain G., Li Q., Ostrikov K.K. Adhesion and cohesion of epoxy-based industrial composite coatings. – *Compos. Part B Eng.* 2020. 193. P. 108035. DOI: 10.1016/j.compositesb.2020.108035.
2. Mostovoy A.S., Yakovlev A., Tseluikin V., Lopukhova M. Epoxy Nanocomposites Reinforced with Functionalized Carbon Nanotubes // *Polymers*. 2020. V.12. Is.8. P. 1816. DOI: 10.3390/polym12081816.
3. Starokadomskii D.L. Epoxy composites with 10 and 50 wt % micronanoiron: strength, microstructure, and chemical and thermal resistance // *Russ. J. Appl. Chem.* 2017. V. 90. P. 1337–1345. DOI: 10.1134/S1070427217080249.
4. Dallaev R., Pisarenko T., Papež N., Sadovský P., Holcman V. A Brief Overview on Epoxies in Electronics: Properties, Applications, and Modifications // *Polymers*. 2023. 15(19). P. 3964. DOI: 10.3390/polym15193964.
5. In-Kwon Hong, Yong Soo Yoon, Seung-Bum Lee. Selection of thinner for epoxy type resins for neon transformer housing // *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 2012. V. 18. P. 1997–2003. DOI: 10.1016/j.jiec.2012.05.018.
6. Смирнов Ю.Н., Шацкая Т.Е., Натрусов В.И. Структурно-кинетические особенности формирования прочностных свойств эпоксиаминных связующих и клеевых соединений на их основе при низких температурах // *Пластические массы*. 2004. №8. С. 26–30.
7. Курбатов В.Г., Пугачева Т.А., Малков Г.В., Красикова М.С., Голиков И.В., Ильин А.А. Исследование влияния активных разбавителей на свойства эпоксидных композиций и покрытий на их основе // *Журн. прикл. химии*. 2020. Т. 93, вып. 9. С. 1291–1300. DOI: 10.31857/S0044461820090054.
8. Contreras P.P., Tyagi P., Agarwal S. Low volume shrinkage of polymers by photopolymerization of 1,1-bis(ethoxycarbonyl)-2-vinylcyclopropanes // *Polym. Chem.* 2015. V. 6. P. 2297–2304. DOI: 10.1039/C4PY01705F.
9. Бабкин О.Э., Ильина В.В., Бабкина Л.А., Сиротинина М.В. Покрытия ультрафиолетового отверждения для функциональной защиты // *Журн. прикл. химии*. 2016. Т. 89, №1. С. 83–89.
10. Минакова Т.Т., Морозова Л.В., Трофимов Б.А. Модификация свойств эпоксидной смолы на основе винилглицидилового эфира этиленгликоля // *Журн. прикл. химии*. 1988. №10. С. 2734–2735.
11. Маркова М.В., Могнонов Д.М., Морозова Л.В. и др. Композиционные протонпроводящие мембраны на основе поливинилглицидилового эфира этиленгликоля // *Высокомолек. соед.* 2014. Т. 56 Б, №2. С. 216–225. DOI: 10.7868/S2308113914020107.
12. Mangold C., Dingels C., Obermeier B., Frey H., Wurm F. PEG-based Multifunctional Polyethers with Highly Reactive Vinyl-Ether Side Chains for Click-Type Functionalization // *Macromolecules*. 2011. 44 (16). P. 6326–6334. DOI: 10.1021/ma200898n.
13. Shundo, A., Yamamoto, S., Tanaka, K. Network Formation and Physical Properties of Epoxy Resins for Future Practical Applications. – *JACS Au*. 2022. V. 2. P. 1522–1542. DOI: 10.1021/jacsau.2c00120.
14. Chun Wu, Yongsu Yan, Yucheng Wang, Ping Sun, Rongrong Qi. Antibacterial epoxy composites with addition of natural *Artemisia annua* waste // *E-Polymers*. 2020. V. 20. P. 262–271. DOI: 10.1515/epoly-2020-0029.
15. Bertani R., Bartolozzi A., Pontefisso A., Quaresimin M., Zappaloro M. Improving the antimicrobial and mechanical properties of epoxy resins via nanomodification: an overview // *Molecules*. 2021. V. 26. P. 5426. DOI: 10.3390/molecules26175426.
16. Goyat M.S., Rana S., Halder S., Ghosh P. K. Facile fabrication of epoxy-TiO₂ nanocomposites: A critical analysis of TiO₂ impact on mechanical properties and toughening mechanisms // *Ultrasonics Sonochemistry*. 2018. V. 40, Part A. P. 861–873. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2017.07.040.
17. Mousavi S.R., Estaji S., Kiaei H., Mansourian-Tabaei M., Nouranian S., Jafari S.H., Ruckdäschel H., Arjmand M., Khonakdar H.A. A review of electrical and thermal conductivities of epoxy resin systems reinforced with carbon nanotubes and graphene-based nanoparticles // *Polym. Test.* 2022. 112. P. 107645. DOI: 10.1016/j.polymer-testing.2022.107645.
18. Pinho A.C., Piedade A.P. Polymeric coatings with antimicrobial activity: a short review // *Polymers*. 2020. V. 12. P. 2469. DOI: 10.3390/polym12112469.
19. Dan Hong, Yidong Wu, Zhengyu Wei, Yi Fang, Yabin Zhu. Intrinsic antibacterial thermosets resin from eugenol and soybean oil: synthesis and properties // *Polymer Testing*. 2023. V. 126. P. 108165. DOI: 10.1016/j.polymer-testing.2023.108165.
20. Уэндлант У. Термические методы анализа. М.: Мир. 1978. 527 с.
21. Suresh S., Saravanan P., Jayamoorthy K., Ananda Kumar S., Karthikeyan S. Development of silane grafted ZnO core shell nanoparticles loaded diglycidyl epoxy nanocomposites film for antimicrobial applications // *Mater. Sci. Eng.* 2016. V. 64. P. 286–292. DOI: 10.1016/j.msec.2016.03.096.
22. Шахназарли Р.З., Гулиев А.М. Синтез и радикальная полимеризация глицидилоксикарбонил- и глицидилоксиметил- замещенных винилоксициклопропанов // *International Innovation Research: сборник статей VI Международной научно-практической конференции / под общ. ред. Г.Ю. Гуляева. Пенза: МНИЦ «Наука и просвещение»*. 2017. С. 26–36. ISBN 978-5-9909511-2-9.
23. Шахназарли Р.З., Алиева А.А., Гулиев А.М. Синтез моно- и дициклопропиловых эфиров и их хлор-, этоксикарбонил- и карбоксилсодержащих производных. Сборник научных трудов «Реактив–2007». Минск. 2008. С. 89–95. ISBN 978-985-08-0928-5.
24. Novakov I.A., Babushkin A.S., Yablokov A.S. Nawrozkij M.B., Vostrikova O.V., Shejkin D.S., Balakin K.V. Synthesis and structure-activity relationships of cyclopropane-containing analogs of pharmacologically active compounds // *Bulletin of the Academy of Sciences of the USSR Division of Chemical Science*. 2018. V. 67(3). P. 395–418. DOI: 10.1007/s11172-018-2087-6.