

СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ДИ[1-(2-ГЛИЦИДИЛОКСИЭТОКСИ) ЭТИЛОВОГО] ЭФИРА ДИФЕНИЛОЛПРОПАНА И ДИГЛИЦИДИЛОВОГО ЭФИРА ДИФЕНИЛОЛПРОПАНА

Юрий Сергеевич Кочергин¹, Виктория Владимировна Золотарева²,
Нина Алексеевна Недоля³

^{1,2} Донецкий национальный университет экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского,
Донецк, ДНР, Россия,

³ Иркутский институт химии имени А. Е. Фаворского СО РАН, Иркутск, Россия,

¹ ivano.tanya2011@yandex.com, ² viktoria802@xmail.ru, ³ nina@irioch.irk.ru

Аннотация. В широком интервале температур проведено сравнительное исследование полимерных композитов на основе эпоксицианированного производного 2-(винилокси)-этоксиметиллоксирана (продукт ЭС-6) и диглицидилового эфира дифенилолпропана (смола Epikote-828). Показано, что при температурах ниже 260 К прочность эпоксицианированного полимера на основе винилокса превосходит прочность полимера на основе Epikote-828. Аналогичная картина наблюдается и для модуля упругости. Что касается деформации при разрыве, то она в исследованном температурном диапазоне (150–300 К) остается практически неизменной для смолы Epikote-828 и практически монотонно снижается с уменьшением температуры испытания для смолы ЭС-6. Методом динамической механической спектроскопии обнаружен ряд релаксационных переходов, связанных как с кооперативным движением сегментов макромолекул, так и более мелких участков молекулярной цепи. Благодаря наблюдаемому сочетанию параметров прочности при растяжении и деформации при разрыве в очень широком интервале температур ниже комнатной, композиция на основе 2-(винилокси)-этоксиметиллоксирана превосходит эпоксицианированные полимеры на основе традиционной смолы Epikote-828 по величине работы разрушения. Это позволяет получать на основе смолы ЭС-6 весьма морозостойкие материалы.

Ключевые слова: ди[1-(2-глицидилоксиэтокси) этиловый] эфир дифенилолпропана, эпоксицианированная смола Epikote-828, деформационно-прочностные, адгезионные свойства, температура стеклования, релаксационные переходы

Для цитирования: Кочергин Ю. С., Золотарева В. В., Недоля Н. А. Сравнительное исследование композитных материалов на основе ди[1-(2-глицидилоксиэтокси) этилового] эфира дифенилолпропана и диглицидилового эфира дифенилолпропана // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2025. Выпуск 2025-1(171) Современные строительные материалы. С. 14–21. doi: 10.71536/vd.2025.1c171.2. edn: qvible.

Original article

COMPARATIVE STUDY OF COMPOSITE MATERIALS BASED ON DI[1-(2-GLYCIDYLOXYETHOXY) ETHYL] ETHER OF DIPHENYLOLPROPANE AND DIGLYCIDYL ETHER OF DIPHENYLOLPROPANE

Yuriy S. Kochergin¹, Victoria V. Zolotareva², Nina A. Nedolya³

^{1,2} Donetsk National University of Economics and Trade named after Mikhail Tugan-Baranovsky,
Donetsk, DPR, Russia,



³ Irkutsk Institute of Chemistry named after A. E. Favorsky SB RAS, Irkutsk, Russia,
¹ivano.tanya2011@yandex.com, ²viktoria802@xmail.ru, ³nina@irioc.irk.ru

Abstract. A comparative study of polymer composites based on an epoxidized derivative of 2-(vinylloxy)-ethoxymethyloxirane (product ES-6) and diglycidyl ether of diphenylolpropane (resin Epikote-828) was carried out over a wide temperature range. It has been shown that at temperatures below 260 K, the strength of the vinylloxy-based epoxy polymer exceeds the strength of the polymer based on Epikote-828. A similar pattern is observed for the modulus of elasticity. As for the deformation at break, it remains practically unchanged in the studied temperature range (150–300 K) for Epikote-828 resin and decreases almost monotonously with decreasing test temperature for ES-6 resin. Dynamic mechanical spectrometry has revealed a number of relaxation transitions associated with the cooperative movement of macromolecule segments and smaller sections of the molecular chain. Due to the observed combination of tensile strength and tensile strain parameters in a very wide temperature range below room temperature, the composition based on 2-(vinylloxy)-ethoxymethyloxirane surpasses epoxy polymers based on the traditional Epikote-828 resin in terms of the amount of fracture work. This makes it possible to obtain very frost-resistant materials based on ES-6 resin.

Keywords: di[1-(2-glycidylloxyethoxy) ethyl] diphenylolpropane ether, Epikote-828 epoxy resin, strain-strength, adhesive properties, glass transition temperature, relaxation transitions

For citation: Kochergin Yu. S., Zolotareva V. V., Nedolya N. A. Comparative study of composite materials based on di[1-(2-glycidylloxyethoxy) ethyl] ether of diphenylolpropane and diglycidyl ether of diphenylolpropane. *Proceeding of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Modern building materials.* 2025;1(171):14–21. (In Russ.). doi: 10.71536/vd.2025.1c171.2. edn: qvibc.

ФОРМУЛИРОВКА ПРОБЛЕМЫ

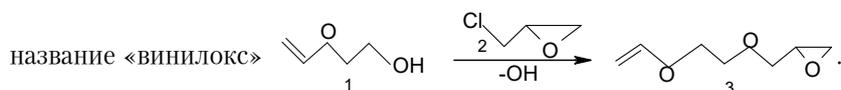
Композиционные материалы на основе эпоксидных смол являются одним из наиболее распространенных видов термореактивных пластических масс. Это связано с тем, что они обладают хорошей адгезией к большому числу металлических и неметаллических подложек, наполнителей и армирующих компонентов, малой усадкой при отверждении, химической стойкостью, высокими электроизоляционными и механическими свойствами. Разнообразие эпоксидных смол и отверждающих агентов позволяет получать после отверждения композиты с широким сочетанием показателей свойств, удовлетворяя различным требованиям технологии. Ассортимент эпоксидных смол довольно длительное время оставался сравнительно стабильным с преобладанием эпоксидно-диановых смол.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Общепринятый способ получения эпоксидных смол заключается в проведении реакции конденсации диглицидилового эфира бисфенола А (дифенилолпропана) с эпихлоргидрином в щелочной среде. Эта реакция не полностью регио- и хемоселективна и сопровождается рядом побочных процессов, приводящих к образованию смесей олигомер-гомологов, что не позволяет строго стандартизировать свойства получаемых продуктов. Разброс значений эпоксидных чисел у одной и той же смолы может носить случайный характер (качество сырья, экспериментальные погрешности). Кроме того, общеизвестные эпоксидные смолы обычно загрязнены хлористым натрием и токсичным эпихлоргидрином и его гомоолигомерами, которые увеличивают токсичность и коррозионную активность, ухудшают диэлектрические свойства, что ограничивает их применение, например, в электроизоляционных материалах.

В результате исследований, проведенных в Иркутском институте химии СО РАН, разработан новый способ синтеза эпоксидных смол с использованием новых соединений – летучих оксидов, содержащих якорную функцию [1]. Такой летучий якорный оксид может быть легко очищен дистилляцией, что позволяет получать смолы заданной степени чистоты.

Системное исследование кинетики и механизма электрофильного присоединения к двойным связям, активированным сопряженными гетероатомами, показало, что подходящей якорной функцией может быть винилокси группа [2–4], с помощью которой синтезировано соединение, получившее технологическое



Коэффициент молекулярной упаковки рассчитывали по формуле [5]:

$$k_{yn} = \frac{N_A \sum \Delta V_i}{M/d}, \quad (3)$$

где M – молекулярная масса повторяющегося звена;
 d – плотность полимера;
 N_A – число Авогадро;
 ΔV_i – собственный (ван-дер-ваальсов) объем повторяющегося звена полимера, складывающийся из инкрементов ван-дер-ваальсовых объемов отдельных атомов, входящих в это звено.

Параметр растворимости Гильденбранда рассчитывали по формуле [5]:

$$\delta = \left(\frac{\sum \Delta E_i^*}{N_A \sum \Delta V_i} \right)^{0,5}, \quad (4)$$

где ΔE_i^* – вклад каждого атома и типа межмолекулярного взаимодействия в величину эффективной молярной энергии когезии;
 N_A – число Авогадро и ΔV_i – то же, что в формуле для расчета k_{yn} .

Температуру стеклования рассчитывали по формуле [5], исходя из принципа аддитивности на основе метода инкрементов с учетом вклада химических узлов:

$$T_c = \frac{\sum \Delta V_i}{(\sum_i a_i \Delta V_i + \sum_i \epsilon_i)_n + (\sum_i K_i^T \Delta V_i)_y}, \quad (5)$$

где $(\sum_i a_i \Delta V_i + \sum_i \epsilon_i)_n$ – набор инкрементов для линейных фрагментов;
 $(\sum_i K_i^T \Delta V_i)_y$ – набор инкрементов для узлов сетки. Коэффициенты a_i и K_i^T характеризуют энергию межмолекулярного взаимодействия.

ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ

В табл. 1 приведены экспериментальные значения прочности при растяжении, деформации при разрыве, адгезионной прочности при сдвиге и равномерном отрыве, времени желатинизации, измеренных при комнатной температуре, и результаты расчета величин работы разрушения, коэффициента упаковки и параметра растворимости исследуемых полимерных материалов. Видно, что прочность и жесткость (мерой которой может служить величина модуля упругости) образцов на основе смолы Epikote-828 существенно выше, чем у образцов на основе смолы ЭС-6. При отверждении без подогрева значение прочности при растяжении у первых примерно в 16 раз, а модуля упругости в 38 раз больше, чем у вторых. После термообработки образцов при 400 К параметры прочности и жесткости композитов на основе смолы ЭС-6 резко возрастают (в 4,5 и 10 раз соответственно) в отличие от образцов на основе смолы Epikote-828, для которых увеличение σ_p и E составляет только 1,27 и 1,05 раза соответственно. Вследствие этого после термообработки разница в значениях прочности и модуля упругости исследуемых смол становится ощутимо меньше. Наблюдаемый характер изменения параметров σ_p , ϵ_p и модуля E , очевидно, можно объяснить тем, что образцы на основе смолы ЭС-6, отвержденные без подогрева, при комнатной температуре находятся в развитом высокоэластическом состоянии, а после термообработки при 400 К за счет увеличения плотности химической сшивки они уже находятся в области перехода из стеклообразного в высокоэластическое состояние.

Деформационная способность образцов на основе смолы ЭС-6 значительно выше, чем у образцов на основе смолы Epikote-828. В случае отверждения композитов при комнатной температуре по режиму 293 К / 168 ч преимущество первых по величине ϵ_p составляет почти 19 раз. После термообработки деформация при разрыве для смолы Epikote-828 несколько возрастает, что, в первую очередь, может быть связано с увеличением свободного объема в результате термообработки [6]. В то же время для полимеров на основе смолы ЭС-6 деформационная способность, наоборот, уменьшается.

Хотя композиция на основе эпоксициклопропановой производной винилокса и обладает существенно меньшей прочностью при растяжении, благодаря более высокой деформационной способности, по величине

работы разрушения (A_p) она практически не уступает композитам на основе смолы Epikote-828 в случае отверждения без подогрева и имеет преимущество над данной смолой при отверждении по режиму, предусматривающему термообработку (табл. 1), что свидетельствует о её большей работоспособности при ударных и вибрационных нагрузках.

Таблица 1. Свойства эпоксидных полимеров на основе исследуемых смол ¹⁾

Марка смолы	ЭП-6	Epikote-828
Прочность при растяжении σ_p , МПа	3,5 / 16,0 ²⁾	56,3 / 71,3
Деформация при разрыве ϵ_p , %	98,1 / 57,2	5,2 / 6,1
Модуль упругости E, МПа	30 / 301	1 150 / 1 210
Адгезионная прочность при сдвиге τ_b , МПа	10,3 / 25,9	14,8 / 16,5
Адгезионная прочность при отрыве $\sigma_{отр}$, МПа	12,5 / 35,3	30,1 / 36,1
Работа разрушения A_p , кДж/м ²	2,74 / 7,3	2,6 / 3,3
Время желатинизации $\tau_{жел}$, ч	4,83	0,7
Коэффициент упаковки $k_{уп}$	0,691	0,535
Параметр растворимости δ , (МДж/м ³) ^{0,5}	19,6	20,8

Примечание: ¹⁾ отвердитель УП-583Д; ²⁾ до наклонной черты – образцы, отвержденные по режиму 293 К / 168 ч, после черты – по режиму 293 К / 24 ч + 400 К / 3 ч.

Композиции на основе ЭС-6 имеют большую величину $\tau_{жел}$, а, следовательно, отличаются большей жизнеспособностью, что расширяет время работы с ними (это особенно важно, когда приходится готовить большие порции материала в случае покрытия им значительных по площади поверхностей) по сравнению со смолой Epikote-828 (табл. 1). При этом после отверждения смолы на основе винилокса формируются полимеры с более высокой плотностью упаковки макромолекул $k_{уп}$ (табл. 1).

Значения параметров растворимости δ для исследованных смол несильно разнятся, что свидетельствует о возможности создания на их основе смесей с хорошей взаиморастворимостью.

Результаты расчета температуры стеклования по формуле 5 для полимера на основе смолы ЭС-6, отвержденной ДЭТА, дают значение 285 К, что несколько ниже экспериментально измеренной величины 298 К. Разница, возможно, обусловлена тем, что при расчете учтены не все виды взаимодействия между молекулами. Отметим, что в формуле 5 величина $\sum \epsilon_i$, учитывающая диполь-дипольное взаимодействие, водородные связи, а также положение ароматических ядер в основной цепи, имеет отрицательное значение, поэтому при ее возрастании по абсолютной величине, знаменатель будет уменьшаться, а следовательно будет выше значение рассчитанной T_c .

Еще одной причиной различия между расчетной и экспериментально измеренными величинами T_c может быть то обстоятельство, что при отверждении смолы образуются локальные участки с более высокой температурой стеклования (выше температуры испытания) и модуля упругости, которые играют роль усиливающего наполнителя. Отметим, что в случае смолы Epikote-828 разница между расчетным (368 К) и экспериментальным (371 К) значениями T_c существенно меньше (0,8 % против 4,6 % для ЭС-6).

Возвращаясь вновь к табл. 1, отметим, что для композиции на основе смолы Epikote-828 адгезионная прочность при отрыве и, особенно, сдвиге намного ниже, чем когезионная прочность. В то же время для смолы ЭС-6 адгезионная прочность больше когезионной. При этом для смолы на основе винилокса, отвержденной с термообработкой, показатель τ_b даже выше, чем у Epikote-828, а величина $\sigma_{отр}$ сопоставима с таковой для Epikote-828. Причину такого различного поведения исследуемых смол можно объяснить тем фактом, что адгезионное разрушение имеет в своей основе не силовой, а энергетический характер. А как мы уже отмечали ранее, величина работы разрушения для смолы на основе винилокса больше A_p композиции на основе Epikote-828.

Рассмотрим далее динамические механические свойства исследуемых систем. Для обеих смол проявляется α -переход, связанный с кооперативным движением сегментов макромолекул. Температура максимума α -перехода зависит от химической природы смолы (табл. 2) и хорошо коррелирует с T_c , определенной из термомеханических исследований. Кроме α -пика, для всех смол проявляется низкотемпературный (вблизи температуры 213 К) β -переход. Чаще всего причину его появления для ЭП связывают с движением по механизму креншфта в точке соединения узлов сетки [7]. Положение β -пика и его максимальные значения также как и α -пика зависят от химического строения эпоксидной смолы. Температура β -пика составляет 203 К для отвержденной смолы ЭП-6 и 213 К для смолы ЭД-20. Кроме α - и β -перехода, для смолы ЭП-6 проявляется более низкотемпературный (по сравнению с β -пиком) δ -переход при 148 К.

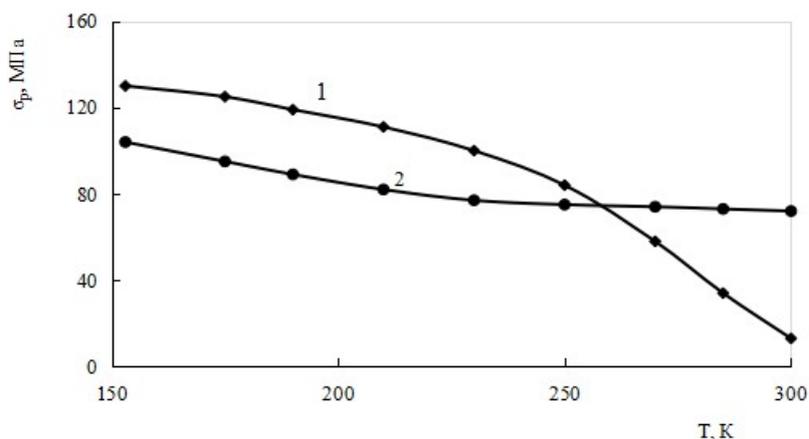
Таблица 2. Температуры релаксационных переходов в эпоксидных полимерах на основе исследуемых смол ¹⁾

Температуры релаксационных переходов	ЭС-6	Epikote-828
Температура стеклования T_g , К	289 / 301 ²⁾	327 / 381
Температура δ -перехода T_{δ} , К	148	–
Температура β -перехода T_{β} , К	203	213
Температура α -перехода T_{α} , К	301	341 / 391

Примечание: ¹⁾ отвердитель УП-583Д; ²⁾ до наклонной черты – образцы, отвержденные по режиму 293 К / 168 ч, после черты – по режиму 293 К / 24 ч + 400 К / 3 ч.

Отметим, что примерно при такой же температуре (153 К) наблюдаются релаксационные переходы в полиэтилене, поликарбонате, полиэтиленадипинате [8]. Энергия активации этого процесса составляет около 29,3 кДж/моль. Согласно Шатцки [9], данный переход в полиэтилене обусловлен движением участков в основной цепи, содержащих четыре последовательно расположенные группы CH_2 . Можно предположить, что в полимере на основе винилокса, причиной, вызывающей δ -переход, является движение цепочки $-\text{CH}_2\text{OCH}_2\text{CH}_2\text{O}-$.

Рассмотрим далее зависимость деформационно-прочностных свойств от температуры испытаний. Видно, что с понижением температуры испытания параметры σ_p (рис. 1) монотонно возрастают. При этом скорость роста для полимеров на основе эпоксидированной производной винилокса существенно выше, чем для смолы Epikote-828. В результате при температурах ниже 260 К прочность эпоксиполимера на основе винилокса превосходит прочность полимера на основе Epikote-828. Аналогичная картина наблюдается и для модуля упругости. Что касается деформации при разрыве, то она в исследованном температурном диапазоне (150–300 К), то она остается практически неизменной для смолы Epikote-828 и практически монотонно снижается для ЭС-6 с уменьшением температуры испытания.

**Рисунок 1** – Температурные зависимости прочности при растяжении для образцов на основе смол ЭС-6 (1) и Epikote-828 (2), отвержденных УП-583Д по режиму 293 К / 24 ч + 400 К / 3 ч.

Благодаря наблюдаемому сочетанию параметров прочности при растяжении и деформации при разрыве в очень широком интервале температур ниже комнатной, композиция на основе 2-(винилокси)-этоксиметилоксирана превосходит эпоксиполимеры на основе традиционной смолы Epikote-828 по величине работы разрушения (рис. 2). Это позволяет получать на основе смолы ЭС-6 весьма морозостойкие материалы.

ВЫВОДЫ

В широком интервале температур проведено сравнительное исследование полимерных композитов на основе эпоксидированного производного 2-(винилокси)-этоксиметилоксирана (продукт ЭС-6) и диглицидилового эфира дифенилолпропана (смола Epikote-828). Показано, что при температурах ниже 260 К прочность эпоксиполимера на основе винилокса превосходит прочность полимера на основе Epikote-828. Аналогичная картина наблюдается и для модуля упругости. Что касается деформации при разрыве, то она в исследованном температурном диапазоне (150–300 К), то она остается практически неизменной для

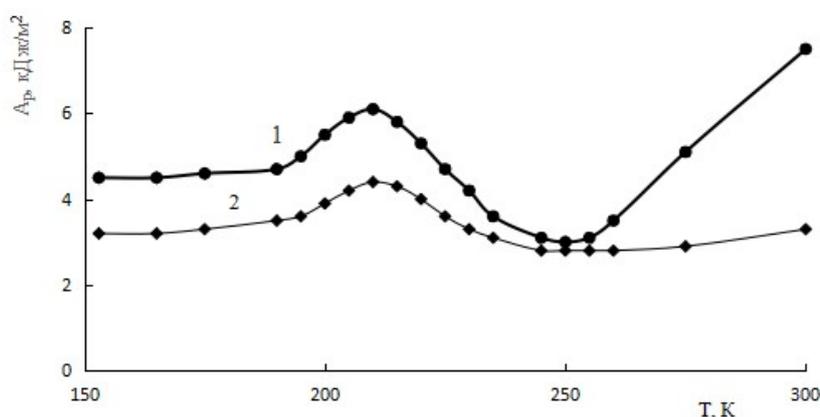


Рисунок 2 – Температурные зависимости работы разрушения для образцов на основе смол ЭС-6 (1) и Epikote-828 (2), отвержденных УП-583Д по режиму 293 К/24 ч + 400 К/3 ч.

смолы Epikote-828 и практически монотонно снижается с уменьшением температуры испытания для ЭС-6. Методом динамической механической спектроскопии обнаружен ряд релаксационных переходов, связанных как с кооперативным движением сегментов макромолекул, так и более мелких участков молекулярной цепи.

Благодаря наблюдаемому сочетанию параметров прочности при растяжении и деформации при разрыве в очень широком интервале температур ниже комнатной, композиция на основе 2-(винилокси)-этоксиметилоксирана превосходит эпоксиполимеры на основе традиционной смолы Epikote-828 по величине работы разрушения. Это позволяет получать на основе смолы ЭС-6 весьма морозостойкие материалы.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Trofimov, V. A. A new strategy in the synthesis of epoxy resins / V. A. Trofimov, N. A. Nedolya. – Текст : непосредственный // *Reviews on Heteroatom Chemistry (Japan)*. – 1993. – Volume 9. – P. 205–209.
2. Properties of oligomer compositions of vinilox and ethylene glycol with ED-20 epoxy / Yu. S. Kochergin, V. V. Shologon, T. I. Grigorenko [et al.]. – Текст : непосредственный // *Polymer Science. Ser. D. – Glues and Sealing Materials*. – 2009. – Volume 1, No. 4. – P. 20–26.
3. Кочергин, Ю. С. Свойства композиционных материалов на основе эпоксидно-диановой смолы, модифицированной ди[1-(2-глицидилоксиэтокси) этиловым] эфиром полиэтиленгликоля / Ю. С. Кочергин, В. В. Золотарева, Н. А. Недоля. – Текст : электронный // *Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры*. – 2024. – Выпуск 2024-1(165) *Современные строительные материалы*. – С. 112–122. – URL: [https://donnasa.ru/publish_house/journals/vestnik/2024/2024-1\(165\)/st_17_kochergin_zolotareva_nedolya.pdf](https://donnasa.ru/publish_house/journals/vestnik/2024/2024-1(165)/st_17_kochergin_zolotareva_nedolya.pdf) (дата обращения: 27.01.2025). – ISSN 2519-2817.
4. Кочергин Ю. С. Эпоксидные композиты: состав, свойства, применение : (учебное пособие) / Ю. С. Кочергин, В. В. Золотарева. – Донецк : «НТИТ», 2024. – 210 с. – ISBN 978-5-00202-699-9. – Текст : непосредственный.
5. Аскадский, А. А. Компьютерное материаловедение полимеров. Атомно-молекулярный уровень : том 1 / А. А. Аскадский, В. И. Кондращенко. – Москва : Научный мир, 1999. – 544 с. – ISBN 5-89176-077-0. – Текст : непосредственный.
6. Эпоксидные олигомеры и клеевые композиции / Ю. С. Зайцев, Ю. С. Кочергин, М. К. Пактер, Р. В. Кучер. – Киев : Наукова думка, 1990. – 200 с. – ISBN 5-12-001431-3. – Текст : непосредственный.
7. Аржаков, М. С. Релаксационные явления в полимерах / М. С. Аржаков. – Москва : Литрес, 2018. – 137 с. – ISBN: 978-1-77192-391-0. – Текст : непосредственный.
8. Матсуока, С. Множественные переходы в поликарбонате / С. Матсуока, И. Ишида. – Текст : непосредственный // *Переходы и релаксационные явления в полимерах*. – 1968. – Москва : Мир. – С. 285–299.
9. Шатцки, Т. Ф. Молекулярная интерпретация γ -перехода в полиэтилене и его производных / Т. Ф. Шатцки. – Текст : непосредственный // *Переходы и релаксационные явления в полимерах*. – 1968. – Москва : Мир. – С. 156–157.

Информация об авторах

Кочергин Юрий Сергеевич – доктор технических наук, профессор кафедры товароведения Донецкого национального университета экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского, Донецк, ДНР, Россия. Научные интересы: технология и физико-механика полимерных композиционных материалов.

Золотарёва Виктория Владимировна – кандидат технических наук, доцент кафедры товароведения Донецкого национального университета экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского, Донецк, ДНР, Россия. Научные интересы: товароведение полимерных и композиционных материалов.

Недоля Нина Алексеевна – доктор химических наук, профессор; ведущий научный сотрудник Иркутского института химии им. А. Е. Фаворского СО РАН, Иркутск, Россия. Научные интересы: химия гетероциклических соединений.

Information about the authors

Kochergin Yuriy S. – D. Sc. (Eng.), Professor, Commodity Science Department, Donetsk National University of Economics and Trade named after Mikhail Tugan-Baranovsky, Donetsk, DPR, Russia. Scientific interests: chemistry, technology, physico-mechanics of polymer and composite materials.

Zolotareva Victoria V. – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Commodity Science Department, Donetsk National University of Economics and Trade named after Mikhail Tugan-Baranovsky, Donetsk, DPR, Russia. Scientific interests: merchandising of polymeric and composite materials.

Nedolya Nina A. – D. Sc. (Chemical), Professor; leading researcher at the Irkutsk Institute of Chemistry named after A. E. Favorsky SB RAS, Irkutsk, Russia. Scientific interests: chemistry of heterocyclic compounds.

Статья поступила в редакцию 23.12.2024; одобрена после рецензирования 17.01.2025; принята к публикации 24.01.2025.

The article was submitted 23.12.2024; approved after reviewing 17.01.2025; accepted for publication 24.01.2025.