

В. Д. Рябова, Е. Н. Черезова

ПОЛИМЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ДЕКСТРИНА С СОВМЕСТИМЫМИ БИОРАЗЛАГАЕМЫМИ МОДИФИКАТОРАМИ

Ключевые слова: биоразложение, плёнки, декстрин, природные модификаторы, совместимость.

Создание плёнок на основе природных полимеров, которые за короткий срок могут разложиться в почве на диоксид углерода и воду, является важным шагом в решении проблемы загрязнения окружающей среды. В качестве основного сырья для получения данных плёнок чаще всего используют такие биополимеры, как крахмал, целлюлозу и её производные, желатин, пектин и казеин. Для изучения свойств плёнок использованы метод термогравиметрии, термического механического анализа, стандартные методы определения упруго-прочностных свойств полимерных пленок. Анализ полученных экспериментальных термогравиметрических и термомеханических кривых плёнок на основе декстрина показал, что полимерные материалы без использования модификаторов имеют низкую термостабильность и термостойкость. Для придания требуемых свойств биоразлагаемым пленкам в их состав введены модификаторы. Методом Гильдебранда-Скетчарда произведен расчёт совместимости ряда природных модификаторов (хитозан, альгинат натрия, полиэтиленгликоль, поливиниловый спирт, карбоксиметилцеллюлоза) с декстрином кукурузного крахмала. Показано, что декстрин хорошо совмещается с указанными модификаторами. Предложен состав полимерного композита на основе декстрина, определено влияние модификаторов на упруго-прочностные свойства, термостабильность и термостойкость плёнок. Выявлено, что такие модификаторы, как хитозан и альгинат натрия оказывают различное влияние на свойства пленок на основе декстрина кукурузного крахмала. Хитозан, улучшает механические свойства плёнок, делая их более эластичными и устойчивыми к внешним воздействиям. Альгинат натрия увеличивает прочность плёнок. При совместном введении в полимерный материал хитозана и альгината натрия получены прочные плёнки, обладающие эластическими свойствами. Таким образом, использование биополимеров и природных модификаторов в производстве экологически безопасных биоразлагаемых пленок является перспективным направлением в области экологии и устойчивого развития. Эти материалы могут найти широкое применение в различных отраслях, таких как упаковка, сельское хозяйство, в том числе для мульчирования почвы, способствуя снижению экологического следа и улучшению состояния окружающей среды.

V. D. Ryabova, E. N. Cherezova

POLYMER MATERIALS BASED ON DEXTRIN WITH COMPATIBLE BIODEGRADABLE MODIFIERS

Keywords: dextrin, natural modifiers, compatibility.

The creation of films based on natural polymers that can decompose into carbon dioxide and water in the soil in a short time is an important step in solving the problem of environmental pollution. The creation of films based on natural polymers that can decompose into carbon dioxide and water in the soil in a short time is an important step in solving the problem of environmental pollution. Biopolymers such as starch, cellulose and its derivatives, gelatin, pectin and casein are most often used as the main raw materials for the production of these films. To study the properties of films, the method of thermogravimetry, thermal mechanical analysis, and standard methods for determining the elastic-strength properties of polymer films were used. The analysis of the experimental thermogravimetric and thermomechanical curves of dextrin-based films has shown that polymer materials without the use of modifiers have low thermal stability and heat resistance. To give the required properties to biodegradable films, modifiers have been introduced into their composition. The Hildebrand-Sketchard method calculated the compatibility of a number of natural modifiers (chitosan, sodium alginate, polyethylene glycol, polyvinyl alcohol, carboxymethylcellulose) with corn starch dextrin. Dextrin has been shown to combine well with these modifiers. The composition of a polymer composite based on dextrin is proposed, the effect of modifiers on the elastic-strength properties, thermal stability and heat resistance of films is determined. It has been revealed that such modifiers as chitosan and sodium alginate have different effects on the properties of corn starch dextrin-based films. Chitosan improves the mechanical properties of films, making them more elastic and resistant to external influences. Sodium alginate increases the strength of the films. When chitosan and sodium alginate are co-introduced into the polymer material, strong films with elastic properties are obtained. Thus, the use of biopolymers and natural modifiers in the production of environmentally friendly biodegradable films is a promising direction in the field of ecology and sustainable development. These materials can be widely used in various industries such as packaging, agriculture, including for soil mulching, contributing to reducing the ecological footprint and improving the environment.

Введение

Использование изделий из полимерных материалов привело к появлению значительного количества отходов и порождению экологических проблем [1]. Их решение требует создания новых материалов, которые могут заменить традиционные пластмассы и эластомеры. Биоразлагаемые полимерные композиты — один из таких материалов,

которые привлекли большое внимание исследователей [2-6].

Применение биоразлагаемых полимеров особенно актуально для двух сфер жизнедеятельности человека — медицины и защиты окружающей среды. В сфере защиты окружающей среды биоразлагаемые полимеры применяются для производства экологически безопасной упаковки, мульчи, которые способны разлагаться в естественных условиях достаточно быстро до углекислого газа и воды,

снижая тем самым нагрузку на природу.

Существует три основных типа биоразлагаемых полимеров: природные, искусственные и синтетические [7-10]. Наиболее перспективным направлением в настоящее время является разработка композиционных полимерных материалов (ПМ) на базе природных биоразлагаемых полимеров с использованием различных модификаторов [11, 12]. Особое внимание в качестве полимерной основы уделяется природному полимеру крахмалу и продуктам его переработки — декстринам [13].

При создании ПМ важным аспектом является совместимость компонентов полимерной композиции. Плохая совместимость компонентов часто обуславливает неудовлетворительные механические свойства композиционного материала [14].

Анализ научных публикаций показал, что для придания требуемых свойств в ПМ на основе полисахаридов используют пластификаторы (глицерин, полиэтиленгликоль (ПЭГ), поливиниловый спирт (ПВС)), модификаторы (хитозан, альгинат натрия, поливинилацетат, желатин), наполнители (тальк, мел, шунгит, древесная мука) [15-20].

При создании ПМ на основе крахмала и его производных вопрос совместимости его с другими природными полимерами и модификаторами является мало изученным.

Задача данного исследования состояла в расчете совместимости ингредиентов полимерных композитов на основе крахмала и его производных с последующим созданием полимерных композитов и изучением их свойств.

Экспериментальная часть

В настоящее время рассматривают несколько теорий, позволяющих количественно оценивать совместимость органических соединений. Наиболее часто используют теоретические методы расчета параметров растворимости (δ) Хансена, Гильдебранда-Скетчарда [21, 22]. Для данного исследования использован метод расчета совместимости органических соединений Гильдебранда-Скетчарда.

В основу этой теории (теории регулярных растворов) положено понятие «плотность энергии когезии» (ПЭК), представляющее собой отношение энергии испарения к мольному объему вещества $E/V_{\text{мол}}$ (Дж/м³). Позднее было предложено использовать в качестве величины, определяющей растворимость, «параметр растворимости» δ – квадратный корень из плотности энергии когезии.

Согласно теории Гильдебранда-Скетчарда, растворение будет происходить при любых соотношениях компонентов, если мольная энтальпия смешения ΔH будет близка к нулю в уравнении:

$$\Delta H = V(\delta_1^2 - \delta_2^2)\Phi_1\Phi_2,$$

где ΔH – теплота смешения, Дж/моль; V – объем смеси, м³/моль; δ_1 и δ_2 – параметры растворимости компонентов (МДж/м³), Φ_1 и Φ_2 – объемные доли компонентов, %.

Чем ближе значение параметров растворимости, тем лучше происходит смешение компонентов. Величина $\beta = (\delta_1 - \delta_2)^2$ называется параметром совместимости.

Квадрат параметра растворимости объема представляет собой плотность энергии когезии жидкости, то есть величину энергии когезии (ΔE), деленную на мольный объем V :

$$\delta^2 = \Delta E / V.$$

Значения δ для полимеров определяется косвенно – расчетным путем по инкрементам энергий отдельных атомов и групп атомов молекулы соединения.

Для расчета параметра растворимости использовано уравнение:

$$\delta^2 = \frac{\sum_i \Delta E_i^*}{(\sum_i \Delta V_i) N_A}, \quad (1)$$

где ΔE_i^* – вклад каждого атома и типа межмолекулярного взаимодействия в энергию когезии жидкости, уменьшенную во столько раз, во сколько ван-дер-ваальсовый объем молекулы меньше мольного объема; ΔE_i^* – величина аддитивная и представляется в виде:

$$\sum \Delta E^* = \sum \Delta E_i^*;$$

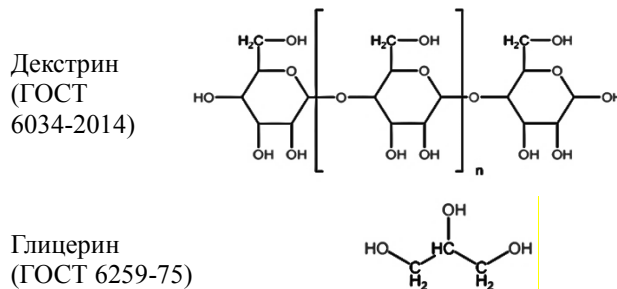
где $\sum_i \Delta V_i$ – собственный (ван-дер-ваальсовый) объем молекулы, складывающийся из инкрементов ван-дер-ваальсовых объемов отдельных атомов; N_A – число Авогадро:

$$\sum_i \Delta V_i = N_1 \cdot \Delta V_1 + N_2 \cdot \Delta V_2 + \dots + N_m \cdot \Delta V_m$$

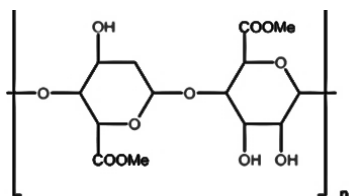
Согласно методу расчета Гильдебранда-Скетчарда суммарная величина энергии когезии ΔE_i^* рассчитывается как сумма долей каждого элемента, входящего в состав молекулы:

$$\Delta E_i^* = N_c \cdot \Delta E_c^* + N_h \cdot \Delta E_h^* + N_o \cdot \Delta E_o^* + \dots$$

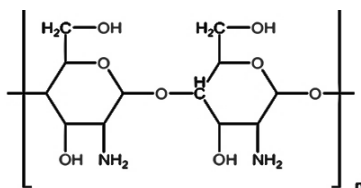
Для получения образцов биоразлагаемых пленок использованы следующие ингредиенты:



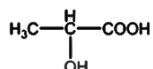
Альгинат натрия
(ГОСТ 33310-2015)



Хитозан
нерастворимый в
воде
(ГОСТ 4328-77)



Молочная
кислота
(ГОСТ 490-2006)



Дистиллированная вода (ГОСТ Р 58144-2018)
Тальк (ГОСТ 21235-75)

Определение упруго-прочностных свойств полимерных пленок проводили в соответствии с ГОСТ 270-81 на разрывной машине Inspect mini с датчиком нагрузки 50Н при скорости движения траверсы 100 мм/мин.

Термограммы снимали на термогравиметрическом дифференциальном термическом анализаторе STA6000 при скорости нагрева 5°C/ мин.

Термомеханические кривые снимали на приборе ТМА 402 F фирмы Netzsch (Германия) при постоянной нагрузке 1 Н. Образцы диаметром 5 мм и толщиной 4 мм подвергали нагреванию со скоростью 5 °C/мин.

Результаты и обсуждения

В качестве основы полимерного материала использован декстрин. Декстрин в сравнении с крахмалом имеет более высокую термостойкость, устойчивость к кислотам, высокую адгезию.

В качестве ингредиентов полимерных композиций использованы компоненты, выбранные на основе литературных данных, об используемых в составах биоразлагаемых полимерных композиционных материалов [2, 3, 5, 6].

Рассчитанные значения ΔE_i^* для различных видов атомов и типов межмолекулярного взаимодействия в молекуле декстрина представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Значения ΔE_i^* для различных видов атомов и типов межмолекулярного взаимодействия в молекуле декстрина

Table 1 – ΔE_i^* values for different types of atoms and types of intermolecular interactions in the dextrin molecule

Атом	N	Условное обозначение	ΔE_i^* , Дж/моль	$N \cdot \Delta E_i^*$, Дж/моль
Углерод С	6	ΔE_C^*	2305,7	13834,0
Водород Н	10	ΔE_H^*	199,7	1997,1
Кислород О	5	ΔE_O^*	591,7	2958,5
$\Sigma \Delta E_i^* = 18\,789,52$, Дж/моль				

Расчет величины ван-дер-ваальсового объема молекулы декстрина:

$$\Sigma_i \Delta V_i = 4 \cdot \Delta V_{C,1} + 1 \cdot \Delta V_{C,2} + 2 \cdot \Delta V_{C,3} + 3 \cdot \Delta V_{C,4} + 1 \cdot \Delta V_{C,5} = 4 \cdot 12,2 + 1 \cdot 16,2 + 2 \cdot 3,4 + 3 \cdot 5,6 + 1 \cdot 15,3 = 48,8 + 16,2 + 6,8 + 16,8 + 15,3 = 87,1 \cdot 10^{-24} \text{ см}^3$$

Используя уравнение (1), с учетом значений ван-дер-ваальсовых объемов инкрементов (рис. 1) рассчитан параметр растворимости:

$$\delta_{\text{декстрин}} = \sqrt{\frac{18\,789,52}{87,1 \cdot 10^{-24} \cdot 0,6022 \cdot 10^{24}}} = 18,92 \text{ (Дж/см}^3)^{1/2}$$

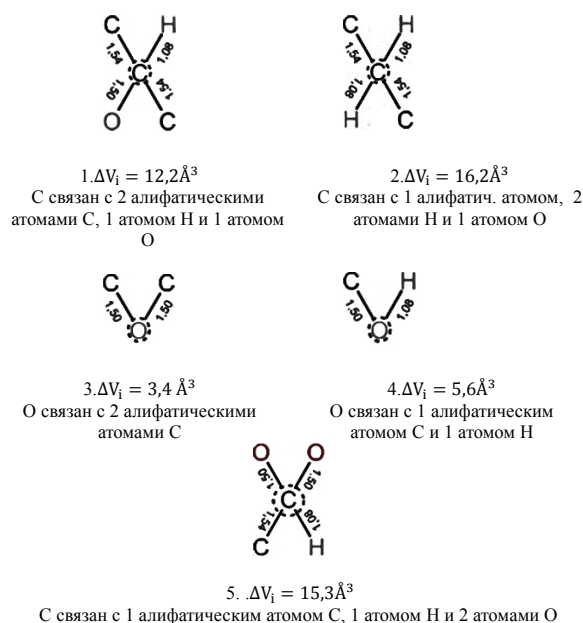


Рис. 1 – Инкременты в молекуле декстрина (ΔV_i – значение ван-дер-ваальсовых объемов инкрементов)

Fig. 1 – Increments in the dextrin molecule (ΔV_i is the value of van der Waals volumes of increments)

Расчеты по другим ингредиентам проведены аналогично (таблица 2).

Таблица 2 – Значения ΔE_i^* ; $\Sigma_i \Delta V_i$, δ , β декстрина, альгината натрия и хитозана

Table 2 – Values of ΔE_i^* ; $\Sigma_i \Delta V_i$, δ , β for dextrin, sodium alginate and chitosan

Название соединения	ΔE_i^* , Дж/моль	$\Sigma_i \Delta V_i$, см ³	δ , (Дж/моль) ^{1/2}	β
Декстрин	18 789,62	$103,9 \cdot 10^{-24}$	18,92	
Хитозан	28 262,72	$105,8 \cdot 10^{-24}$	16,42	1,58
Альгинат натрия	18 818,19	$98 \cdot 10^{-24}$	17,86	1,02
Глицерин	10 289,79	$61,4 \cdot 10^{-24}$	16,68	2,05
ПЭГ	6001,88	$46,1 \cdot 10^{-24}$	14,70	2,04
ПВС	6001,88	$30,9 \cdot 10^{-24}$	17,95	1,00
КМЦ	48623,29	$234,3 \cdot 10^{-24}$	18,56	0,6

Установлено, что растворимости (δ) декстрина с используемыми модификаторами близки. Величина параметром совместимости (β) меньше единицы.

На основе расчетных данных предложены составы полимерных композиций (таблица 3), получены и исследованы пленки, предлагаемые в качестве мульчи, в состав которых входили, наряду с декстрином, глицерин, хитозан, альгинат натрия, молочная кислота [23, 24].

Упруго-прочностные характеристики пленок представлены в таблице 3.

Выявлено, что при добавлении в базовую композицию в качестве модификатора хитозана относительное удлинение пленок при разрыве

увеличивается практически в 2 раза (до 37,2%) по сравнению с пленкой без модификатора.

Использование в качестве модификатора АН приводит к снижению относительного удлинения при растяжении, при этом условная прочность пленок при растяжении повышается до 5,9 МПа.

При совместном введении в композицию хитозана и АН получены достаточно прочные пленки, обладающие эластическими свойствами.

Анализ термогравиметрических кривых показал, что термостабильность образцов, содержащих хитозан и модифицирующую композицию хитозана и АН выше, чем термостабильность образцов без модификаторов (рисунок 2).

Таблица 3 – Состав и упругопрочностные свойства пленок на основе декстрина

Table 3 – Composition and elastic strength properties of dextrin-based films

№ комп.	Состав компонентов, масс.ч.							δ_p , МПа	ϵ_p , %	Е, МПа
	Декстрин	Глицерин	Вода	Хитозан	МК*	АН	Тальк			
1	100	40	200	-	-	-	0,2	3,2	14,6	78,5
2	100	40	200	0,4	0,7	-	0,2	2,5	37,2	85
3	100	40	200	-	-	1	0,2	5,9	8,6	148
4	100	40	200	0,4	0,7	1	0,2	4,9	21,4	141

*МК- молочная кислота

Анализ термомеханических кривых указывает, что образец без хитозана имеет невысокую температуру размягчения, и при 140°C образец продавливается на 80% (рисунок 3). В то время как образцы, содержащие хитозан и его композицию с АН не размягчаются при температуре 150°C и являются термостойкими.

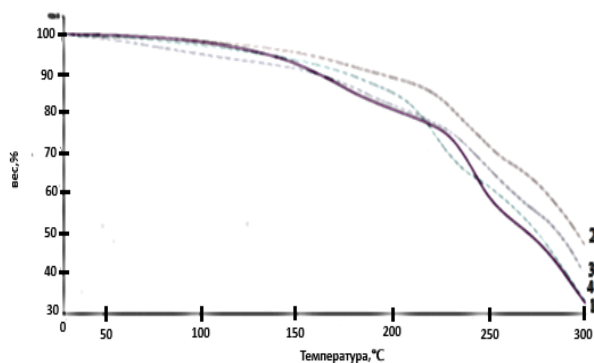


Рис. 2 – ТГ-кривые пленок на основе декстрина: 1 – без модификаторов; 2 – 0,4 % хитозана; 3 – 1 % АН; 4 – 0,4% хитозана и 1% АН

Fig. 2 – TG curves of dextrin-based films: 1 - without modifiers; 2 - 0.4% chitosan; 3 - 1% sodium alginate; 4 - 0.4% chitosan and 1% sodium alginate

Для тестирования образцов на биоразложение использовали метод имитации естественных почвенных условий. Образцы плёнок помещали на поверхность специально подготовленной почвы. Время экспозиции составляло 30 суток. Гравиметрическим методом показано, что пленки на основе декстрина с различными модификаторами имеют сравнимые скорости разложения [25].

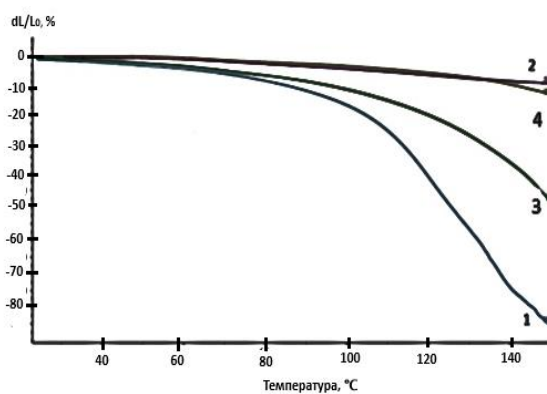


Рис. 3 – Термомеханические кривые пленок на основе декстрина: 1 – без модификатора; 2 – 0,4 % хитозана; 3 – 1 % АН; 4 – 0,4% хитозана и 1% АН

Fig. 3 – Thermomechanical curves of dextrin-based films: 1 - without modifier; 2 - 0.4% chitosan; 3 - 1% sodium alginate; 4 - 0.4% chitosan and 1% sodium alginate

Заключение

Методом Гильдебранда-Скетчарда проведена количественная оценка совместимости декстрина с рядом биоразлагаемых модификаторов (хитозаном, альгинатом натрия, полиэтиленгликолем, поливиниловым спиртом, карбоксиметилцеллюлозой). Показано, что значения параметров растворимости δ и совместимости β декстрина с указанными природными модификаторами близки.

Предложен состав полимерной композиции на основе декстрина с совместимыми природными соединениями, определены физико-механические

свойств пленок, их термостабильность и термостойкость.

Показано, что полимерные пленки на основе декстрина, содержащие в качестве модификаторов хитозан, совместно с альгинатом натрия, имеют высокие упруго-прочностные свойства, высокие термостабильность и термостойкость. Пленки на основе декстрина с различными модификаторами имеют сравнимые скорости разложения.

Литература

1. Т.И. Демьяненко, Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля, 12, 78, 33-35 (2023).
2. И.Н. Вихарева, И.И. Зарипов, Д.Ф. Кинзябулатова, Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал, 12, 6, 320-325 (2020).
3. Е.Л. Горшенина, О. Ю.Сипайлова, Е.Э. Савченкова, Экономика строительства, 6, 251-254 (2024).
4. П.В. Пантюхов, Е.Е. Масталыгина, З.Р. Абушахманова, Н.Г. Купинский, А.А. Попов, Плехановский научный бюллетень, 24, 2, 56-61 (2023).
5. Е.В. Воробьева, А.А. Попов, Полимерные материалы и технологии, 8, 2, 6-24 (2022).
6. Р.А. Безязыкая, А.В. Кипря, Е.Л. Сокурено, Пожарная и техносферная безопасность: проблемы и пути совершенствования, 1, 8, 41-42 (2021).
7. Е.Н. Черезова Е.Н., А.М. Накып, Ю.С. Карасева, Бутлеровские сообщения, 68, 11, 47-53 (2021).
8. E.N. Cherezova E.N., Yu.S. Karaseva, A.M. Nakyp, Polymer Science, 16, 3, 681-686 (2023).
9. А.В. Лисин, Д.И. Абрамова, Е.П. Прокопьева, А.Н.Федорчук, А.И. Ахмедова, Р.Р. Спиридонова. Вестник Технологического университета, 21, 1, 16-18 (2018).
10. А.М. Накып, Е.Н. Черезова, Ю.С. Карасева, А.И. Нуриев, Вестник технологического университета, 8, 58-63 (2023).
11. А.М. Накып, Е.Н. Черезова, Ю.С. Карасева, Вестник Технологического университета, 24, 9, 49-52 (2021). Т. 24. № 9. С. 49-52.
12. А.Ю. Анпилова, Е.Е. Масталыгина, Н.П. Храмева, Химическая физика, 39, 66-74 (2020).
13. А.Е. Заикин, Вестник Технологического университета, 23, 53-66 (2020).
14. Е.Н. Подденежный, Вестник Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого, 2, 31-41 (2015).
15. С.Н. Ермаков, Пластические массы, 4, 32-33 (2012).
16. И.Ю. Потороко, А.В. Малинин, Вестник Южно-Уральского государственного университета, 10, 107-116 (2002).
17. А.Ш. Закирова, З.А. Канарская, О.С. Михайлова, С.В. Василенко, Вестник Технологического университета, 17, 114-121 (2014).
18. Л.С. Дышлюк, А.Ю. Просеков, Л.К. Асякина, Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология, 9, 703-711 (2019).
19. С.А. Оспарина, Молодой ученый, 4, 194-197 (2016).
20. Н.М. Куксов, Д.А. Иванкевич, М.В. Майков, Химия и химическая технология в 21 веке: материалы 23 Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых им. выдающихся химиков Л.П. Кулёва и Н.М. Кижнера (Томск, 16-19 мая 2022), Томск, 2022. С. 323-324.
21. О.А. Мельникова. Дисс. канд. хим. наук, Ур. гос. ун-т им. А. М. Горького, 2002, 124 с.

22. А.А. Аскадский, Химическое строение физические свойства полимеров, Химия, Москва, 1983, 248 с.
23. В.Д. Рябова, Е.Н. Черезова, Сборник материалов Международной научно-практической конференции «Наследие В.И. Вернадского и современные проблемы экологии» (Казань, 22 апреля 2024), Казань, КГАСУ, 2024, С. 201.
24. Пат. Россия RU2822267C1 (2024).
25. Н.В. Галкина, В.Д. Назарова, Е.В. Перушкина, Р.Р. Спиридонова, Сборник научных трудов Международной научно-технической молодежной конференции, Томск, НИТПУ, 2022, С. 167-170.

References

1. I. Demyanenko, Bulletin of Vladimir Dahl Lugansk State University, 12, 78, 33-35 (2023).
2. I.N. Vihareva, I.I. Zaripov, D.F. Kinzyabulatova, Nanotechnologies in construction: scientific internet journal, 12, 6, 320-325 (2020).
3. E.L. Gorshenina, O.Y. Sipailova, E.E. Savchenkova, Economics of Construction, 6, 251-254 (2024).
4. P.V. Pantukhov, E.E. Mastalygina, Z.R. Abushakhmanova, N.G. Kupinsky, A.A. Popov, Plekhanov Scientific Bulletin, 24, 2, 56-61 (2023).
5. E.V. Vorobyeva, A.A. Popov, Polymeric Materials and Technologies, 8, 2, 6-24 (2022).
6. R.A. Bezyazyazkaya, A.V. Kiprya, E.L. Sokurenko, Fire and technosphere safety: problems and ways of improvement, 1, 8, 41-42 (2021).
7. E.N. Cherezova, E.N., A.M. Nakyp, Y.S. Karaseva, Butler Communications, 68, 11, 47-53 (2021).
8. E.N. Cherezova E.N., Yu.S. Karaseva, A.M. Nakyp, Polymer Science, 16, 3, 681-686 (2023).
9. A.V. Lisin, D.I. Abramova, E.P. Prokopyeva, A.N. Fedorchuk, A.I. Akhmedova, R.R. Spiridonova. Herald of Technological University, 21, 1, 16-18 (2018).
10. A.M. Nakyp, E.N. Cherezova, Y.S. Karaseva, A.I. Nuriev, Herald of Technological University, 8, 58-63 (2023).
11. A.M. Nakyp, E.N. Cherezova, Y.S. Karaseva, Herald of Technological University, 24, 9, 49-52 (2021). Т. 24. № 9. С. 49-52.
12. A.Y. Anpilova, E.E. Mastalygina, N.P. Khrameeva, Chemical Physics, 39, 66-74 (2020).
13. A.E. Zaikin, Herald of Technological University, 23, 53-66 (2020).
14. E.N. Poddenezhny, Bulletin of P.O. Sukhoi Gomel State Technical University, 2, 31-41 (2015).
15. S.N. Ermakov, Plastic Masses, 4, 32-33 (2012).
16. I.YU. Potorocho, A.V. Malinin, Bulletin of South Ural State University, 10, 107-116 (2002).
17. A.Sh. Zakirova, Z.A. Kanarskaya, O.S. Mikhailova, S.V. Vasilenko, Herald of Technological University, 17, 114-121 (2014).
18. L.S. Dyshlyuk, A.Yu. Prosekov, L.K. Asyakina, Izvestiya vuzov. Applied chemistry and biotechnology, 9, 703-711 (2019).
19. S.A. Osparina, Young Scientist, 4, 194-197 (2016).
20. N.M. Kuksov, D.A. Ivankevich, M.V. Maikov, Chemistry and chemical technology in the 21st century: proceedings of the 23rd International Scientific and Practical Conference of Students and Young Scientists named after the outstanding chemists L.P. Kulev and N.M. Kizhner (Tomsk, May 16-19, 2022), Tomsk, 2022. С. 323-324.
21. O.A. Melnikova. Dissertation of Candidate of Chemical Sciences, Ural State University named after A. M. Gorky. A. M. Gorky, 2002, 124 p.
22. A. Askadsky, Chemical Structure and Physical Properties of Polymers, Chemistry, Moscow, 1983, 248 p.

23. V.D. Ryabova, E.N. Cherezova, Proceedings of the International Scientific and Practical Conference "The Legacy of V.I. Vernadsky and Modern Problems of Ecology (Kazan, April 22, 2024), Kazan, KGASU, 2024, P 201.

24. Pat. Russia RU2822267C1 (2024).

25. N.V. Galkina, V.D. Nazarova, E.V. Perushkina, R.R. Spiridonova, Collection of scientific papers of the International Scientific and Technical Youth Conference, Tomsk, NITPU, 2022, P 167-170

© **В.Д. Рябова** – аспирант кафедры технологии синтетического каучука (ТСК), Казанский национальный исследовательский технологический университет (КНИТУ), Казань, Россия, violetta98-12@mail.ru; **Е. Н. Черезова** – д. хим. наук кафедра ТСК, КНИТУ, cherezova59@mail.ru.

© **V. D. Ryabova** – PhD-student of the Department of Synthetic Rubber Technology (SRT), Kazan National Research Technological University (KNRTU), Kazan, Russia, violetta98-12@mail.ru; **E. N. Cherezova** – Doctor of Sciences (Chemical Sci.), the SRT department, KNRTU, e-mail: cherezova59@mail.

Дата поступления рукописи в редакцию – 20.12.24.

Дата принятия рукописи в печать – 12.02.25.