

Технологические аспекты получения материалов на основе термопластичного крахмала

Любовь Н. Студеникина	¹	lubov-churkina@ya.ru	 0000-0001-6613-4974
Игорь В. Коленко	¹	kolenko.igor.55@gmail.com	
Вероника Е. Углова	¹	veronika200312@gmail.com	
Александр А. Мельников	²	melnikov.shura@inbox.ru	

¹ Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия

Аннотация. Разработка материалов на основе термопластичного крахмала актуальна при создании экобезопасной упаковки, а также перспективна для получения функциональных материалов в других отраслях. Крахмал является одним из самых доступных и дешевых природных полисахаридов, но получение на его основе пленок и корпусных изделий осложняется процессами ретроградации, для решения данной проблемы необходимы технологические приемы пластификации, сшивки и компаундирования. Целью исследования является разработка рецептуры для получения пленочного материала на основе крахмала, обладающего удовлетворительными физико-механическими показателями. Объектами исследования были выбраны два вида крахмала – картофельный и кукурузный, в качестве связующих полимеров использовали поливиниловый спирт (ПВС) и желатин, в качестве комплексного пластификатора – смесь мочевины и глицерина в различных соотношениях. Пленки получали методом жидкофазного компаундирования 5% раствора крахмала и 5% раствора связующего полимера, с последующей отливкой и обезвоживанием на воздухе. Прочностные показатели полученных пленок определяли по ГОСТ 11262-2017 (с использованием разрывной машины РМ-50 с программным обеспечением StretchTest), водорастворимость оценивали визуально, сорбционные свойства оценивали через набухаемость по массе (при экспозиции в эксикаторе с водой, $t = 20^{\circ}\text{C}$). Установлено, что использование комплексного пластификатора «глицерин+мочевина» эффективно снижает ретроградационные процессы при получении пленок из крахмала (предпочтительнее использовать картофельный крахмал ввиду большего содержания амилопектина, повышающего эластичность пленок), оптимальное содержание пластификатора составляет 30 масс.ч на 100 масс.ч крахмала, повышение количества мочевины увеличивает прочность материала, минимальное количество связующего агента (полимера) составляет 20 масс.ч на 100 масс.ч крахмала, при этом пленки приобретают гибкость (стойкость к излому), фрагментация пленок при экспозиции в воде начинается при достижении температуры 60°C (до этого пленки набухают, но сохраняют целостность формы), скорость фрагментации максимальна для образцов, содержащих желатин в качестве связующего, сорбционная емкость экспериментальных образцов для водяного пара достигает 120–200 масс.%, при этом у образцов, содержащих в качестве связующего ПВС, наблюдается лучшая влагоудерживающая способность.

Ключевые слова: крахмал, экоупаковка, ретроградация, пластификатор, прочностные показатели, сорбционная емкость.

Technological aspects of obtaining materials based on thermoplastic starch

Lyubov N. Studenikina	¹	lubov-churkina@ya.ru	 0000-0001-6613-4974
Igor V. Kolenko	¹	kolenko.igor.55@gmail.com	
Veronika E. Uglova	¹	veronika200312@gmail.com	
Alexandr A. Melnikov	²	melnikov.shura@inbox.ru	

¹ Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia

Abstract. The development of materials based on thermoplastic starch is relevant when creating eco-safe packaging, as well as promising for obtaining functional materials in other industries. Starch is one of the most affordable and cheap natural polysaccharides, but the production of films and body products based on it is complicated by retrogradation processes, and technological methods of plasticization, crosslinking and compounding are necessary to solve this problem. The aim of the study is to develop a formulation for obtaining a starch-based film material with satisfactory physical and mechanical properties. The objects of the study were two types of starch – potato and corn, polyvinyl alcohol (PVA) and gelatin were used as binding polymers, and a mixture of urea and glycerin in various ratios was used as a complex plasticizer. The films were obtained by liquid-phase compounding of 5% starch solution and 5% binder polymer solution, followed by casting and dewatering in air. The strength parameters of the obtained films were determined according to GOST 11262-2017 (using a RM-50 bursting machine with StretchTest software), water solubility was assessed visually, sorption properties were assessed through swelling by weight (when exposed in a desiccator with water, $t = 20^{\circ}\text{C}$). It was found that the use of the complex plasticizer "glycerin + urea" effectively reduces retrogradation processes in the production of films from starch (it is preferable to use potato starch due to the higher content of amylopectin, which increases the elasticity of films), the optimal content of the plasticizer is 30 wt.h per 100 wt.h. starch, increasing the amount of urea increases the strength of the material, the minimum amount of binder (polymer) is 20 wt.h. per 100 wt.h. starch, while the films acquire flexibility (resistance to fracture), fragmentation of films during exposure in water begins when the temperature reaches 60°C (before that, the films swell, but retain the integrity of the shape), the fragmentation rate is maximum for samples containing gelatin as a binder, the sorption capacity of experimental samples for water vapor reaches 120–200 wt.%, while samples containing PVA as a binder have a better moisture retention capacity.

Keywords: starch, eco-packaging, retrogradation, plasticizer, strength characteristics, sorption capacity.

Для цитирования

Студеникина Л.Н., Коленко И.В., Углова В.Е., Мельников А.А. Технологические аспекты получения материалов на основе термопластичного крахмала // Вестник ВГУИТ. 2024. Т. 86. № 2. С. 284–289. doi:10.20914/2310-1202-2024-2-284-289

For citation

Studenikina L.N., Kolenko I.V., Uglova V.E., Melnikov A.A. Technological aspects of obtaining materials based on thermoplastic starch. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2024. vol. 86. no. 2. pp. 284–289. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2024-2-284-289

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

Введение

Разработка биоразлагаемых (компостируемых) и водорастворимых материалов на основе природных возобновляемых полимеров актуальна для решения проблемы накопления синтетических неразлагаемых отходов в окружающей среде, а также перспективна для создания функциональных материалов не только в упаковочной индустрии, но и сельском хозяйстве, медицине, гигиене и пр. [1, 2]

Водорастворимые материалы являются трендом современной упаковочной индустрии, но водорастворимая упаковка на основе синтетических полимеров имеет ряд недостатков, в первую очередь – недоказанную эффективность биоразложения в естественных условиях, дороговизну, истощаемость сырья для производства и пр. [3, 4].

Крахмал – природный полисахарид, который является одним из наиболее доступных, дешевых, биоразлагаемых полимеров, он может быть получен из различных легко возобновляемых видов сельскохозяйственных культур, и поэтому привлекателен в качестве сырья для создания упаковки [5]. В то же время высокая гидрофильность крахмала, низкие механические свойства и способность к ретроградации делают его непригодным для получения пленок в чистом виде [6, 7].

Крахмал можно получить из большого количества растительных культур: кукуруза, картофель, горох, тапиока и т. д. Крахмалы различных культур отличаются соотношением амилозы и амилопектина, что влияет на ряд технологических параметров переработки и на прочностные показатели получаемых пленок [8]. Содержание амилопектина очень важно для пленкообразующей способности крахмала, т. к. линейная амилоза образует более кристаллическую структуру пленок, которые имеют весьма низкую прочность на изгиб, в то время как разветвленный амилопектин придает аморфность, что сопровождается повышением эластичности материала, однако при этом растворы крахмала с высоким содержанием амилопектина более вязкие и требуют больших энергозатрат при переработке [9].

Модифицированные крахмалы (которые классифицируют на набухающие, расщепленные, стабилизированные и сшитые) обладают некоторыми преимуществами перед нативными, но при этом они более дорогостоящие [10]. При получении пленок из крахмала следует учитывать его способность к ретроградации. Ретроградация – это перестроение амилозы и линейной части амилопектина в кристаллическую структуру при охлаждении раствора (расплава) [11].

Параллельно выстроенные молекулы образуют слабые водородные связи, из-за чего плёнки ломаются без внешних воздействий.

В работе [7] авторами отмечено, что низкая технологичность крахмала из-за наличия водородных связей и межмолекулярных взаимодействий препятствует его переработке и применению, решением является пластификация. В разных источниках пластифицированный крахмал может называться термопластичным, но следует понимать, что процесс пластификации не превращает крахмал в термопластичный материал до тех пор, пока его не смешают с «упрочняющим» полимером. Т.о. термопластичный крахмал (TPS) – это композит пластифицированного крахмала и какого-либо полимера, обеспечивающего прочность материала. Надо отметить, что TPS производится достаточно давно за рубежом и представлен на рынке такими торговыми марками как Novamont, Sphere, Plantic и др. [12].

В качестве «упрочняющего» полимера при получении пленок TPS могут применяться: поливиниловый спирт (ПВС) [13], желатин [14], полилактид [15, 16], полигидроксibuтират [17] и др. Соотношение крахмала и упрочняющего полимера может быть различным. В качестве пластификатора применяют глицерин, гликоль, сорбит и т. д. [18]. Пластификаторы обеспечивают текучесть крахмала, но не обеспечивают стойкость пленок к ретроградации. «Подшивка» крахмала помогает добиться долговечности пленок [19]. Технологически получить пленки на основе крахмала возможно двумя способами – отливкой из раствора или экструзией пластифицированной смеси. Оба метода имеют свои достоинства и недостатки [20].

Цель работы – разработка рецептуры для получения пленочного материала на основе крахмала, обладающего удовлетворительными физико-механическими показателями.

Материалы и методы

Объектами исследования были плёнки из картофельного и кукурузного крахмала с добавлением комплексного пластификатора (глицерин + мочевины, в разном соотношении), а также комплексного пластификатора в разном соотношении и связующего агента – полимера (ПВС и желатина). Рецептурная нумерация экспериментальных образцов отражена в таблице 1.

Пленки получали методом жидкофазного компаундирования 5% раствора крахмала, пластификатора и 5% раствора связующего полимера, с последующей отливкой и обезвоживанием на воздухе.

Методы исследования: прочностные показатели пленок определяли по ГОСТ 11262–2017

(с помощью разрывной машины РМ-50 с программным обеспечением StretchTest), водорастворимость пленок оценивали визуально при экспозиции в воде с различной температурой ($20 \div 80^\circ\text{C}$), сорбционные свойства по отношению к водяному пару оценивали через набухаемость по массе (эксикаторным методом, $t = 20^\circ\text{C}$).

Таблица 1.
Рецептурная нумерация образцов

Table 1.
Prescription numbering of samples

№	Основа (100 мас. ч.) Base (100 wt.h.)	Связующий агент (20 мас. ч.) Binding agent (20 wt.h.)	Комплексный пластификатор «глицерин: мочеви́на» (30 мас. ч.), в соотношении Complex plasticizer "glycerin: urea" (30 wt.h.), in the ratio
1	Крахмал картофельный	—	20:10
2			15:15
3			10:20
4		ПВС 17–88	20:10
5			15:15
6			10:20
7		желатин	20:10
8			15:15
9			10:20

Результаты

На рисунке 1 показаны образцы пленок на основе кукурузного и картофельного крахмала при различном соотношении компонентов комплексного пластификатора (без связующего полимера). Ретроградация кукурузного крахмала (верхний ряд) приводит к значительным дефектам пленочного материала, чего не наблюдается для образцов на основе картофельного крахмала (нижний ряд).

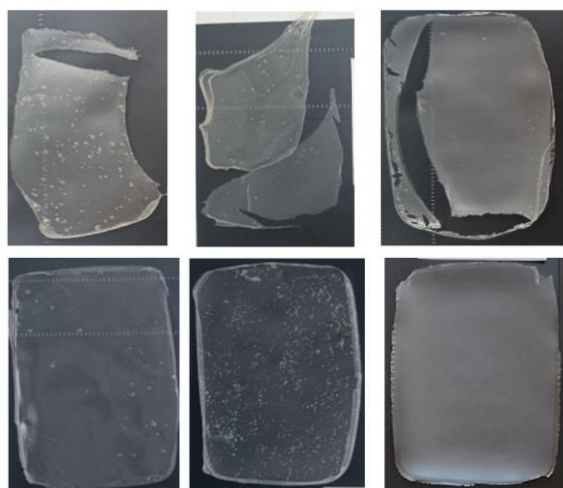


Рисунок 1. Образцы на основе кукурузного (верхний ряд) и картофельного (нижний ряд) крахмала

Figure 1. Samples based on corn starch (top row) and potato starch (bottom row)

Результаты оценки прочностных показателей образцов № 1–9 представлены в таблице 2.

Отмечено повышение прочностных показателей в $1,5 \div 2$ раза при введении связующего полимера в крахмальные пленки.

Таблица 2.
Прочностные показатели образцов

Table 2.
Strength characteristics of samples

№	Модуль Юнга Young's module	Прочность при разрыве, МПа Tensile strength, MPa	Относит. удлинение, % Relative elongation, %
1	3.3	20	6
2	3.4	24	7
3	3.1	25	8
4	6.3	38	6
5	5.8	46	8
6	4.4	22	5
7	5.4	27	5
8	4.3	39	9
9	6.8	55	8

На рисунке 2 представлены результаты оценки растворимости исследуемых пленок в воде с температурой 40 и 60°C .

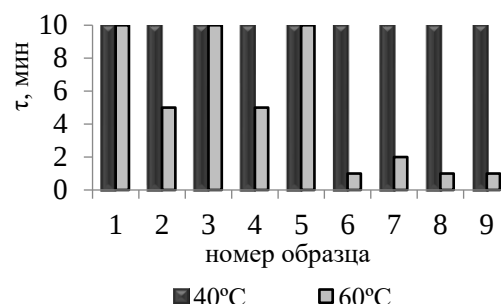


Рисунок 2. Время растворения экспериментальных образцов в воде с различной температурой

Figure 2. The time of dissolution of experimental samples in water with different temperatures

При оценке растворимости отмечено, что все исследуемые образцы не подвергались растворению в воде с температурой 20°C , при достижении температуры 40°C время растворения составляло не менее 10 минут для всех образцов. В воде с температурой 60°C максимальная скорость растворения у образцов, содержащих желатин в качестве связующего.

Сорбция воды набухающими полярными полимерами зависит как от плотности упаковки макромолекул (или степени кристалличности), так и от термодинамического сродства к воде.

На рисунке 3 показаны результаты оценки сорбционных свойств пленок по отношению к водяному пару (температура 20°C). Среди исследуемых образцов максимальной сорбцией водяного пара обладают пленки, содержащие желатин (№ 7–9). Отмечен однотипный характер динамики сорбции для всех образцов: достижение максимума набухаемости за 2000 мин, с последующим плавным снижением массы до достижения сорбционного равновесия.

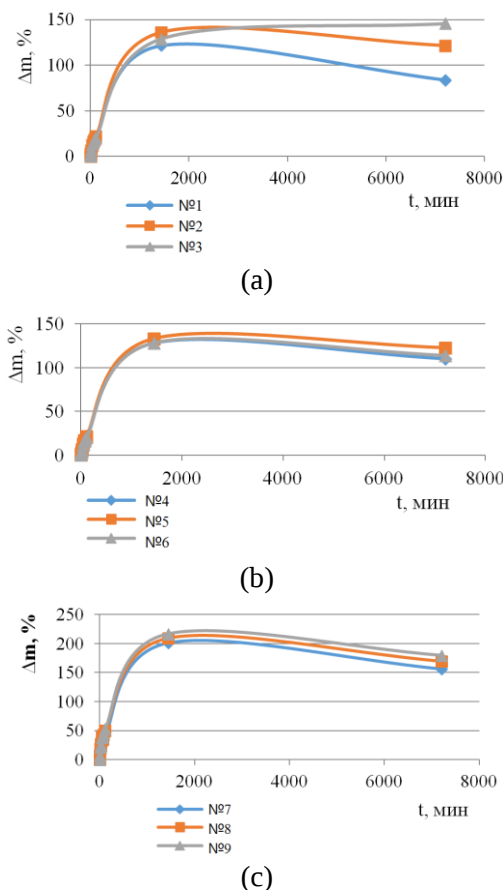


Рисунок 3. Динамика сорбции водяного пара пленками: (а) № 1–3; (б) № 4–6; (с) № 7–9

Figure 3. Dynamics of water vapor sorption by films: (а) № 1–3; (б) № 4–6; (с) № 7–9

Заключение

Установлено, что использование комплексного пластификатора «глицерин + мочеви́на» эффективно снижает ретроградационные процессы при получении пленок из крахмала (предпочтительнее использовать картофельный крахмал ввиду большего содержания амилопектина, повышающего эластичность пленок), оптимальное содержание пластификатора составляет 30 масс. ч на 100 мас. ч. крахмала, повышение количества мочевины увеличивает прочность материала, минимальное количество связующего агента (полимера) составляет 20 масс. ч. на 100 мас. ч. крахмала, при этом пленки приобретают гибкость (стойкость к излому), фрагментация пленок при экспозиции в воде начинается при достижении температуры 60 °С (до этого пленки набухают, но сохраняют целостность формы), скорость фрагментации максимальна для образцов, содержащих желатин в качестве связующего, сорбционная емкость экспериментальных образцов для водяного пара достигает 120–200 мас.%, при этом у образцов, содержащих в качестве связующего ПВС, наблюдается лучшая влагоудерживающая способность.

Литература

- 1 Студеникина Л.Н., Домарева С.Ю., Голенских Ю.Е., Матвеева А.В. Особенности высоконаполненных композиций на основе различных марок поливинилового спирта // Вестник ВГУИТ. 2021. Т. 83. № 1 (87). С. 316–322.
- 2 Хабибуллина Л.Ф., Сидоров Ю.Д., Поливанов М.А., Василенко С.В. Свойства композиционных плёночных материалов на основе поливинилового спирта. Вестник Казанского технологического университета. 2016. № 21. С. 109–113.
- 3 Студеникина Л.Н., Корчагин В.И., Попова Л.В., Саввин П.Н. Биodeградация бинарных композиций на основе поливинилового спирта // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Химия. 2021. Т. 14. № 1. С. 111–119.
- 4 Julinová M., Vaňharová L., Jurca M. Water-soluble polymeric xenobiotics – Polyvinyl alcohol and polyvinylpyrrolidone – And potential solutions to environmental issues. A brief review // Journal of Environmental Management. 2018. № 228. P. 213–222.
- 5 Подденежный Е.Н., Бойко А.А., Алексеенко А.А., Дробышевская Н.Е. и др. Прогресс в получении биоразлагаемых композиционных материалов на основе крахмала (обзор) // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. 2015. № 2. С. 31–41.
- 6 Kabdrakhmanova Sana K. et al. Synthesis, characteristics and antibacterial activity of polymeric films based on starch and polyvinyl alcohol // Journal of chemical technology and metallurgy. 2018. № 1. P.50–60.
- 7 Surendren A., Mohanty A.K., Liu Q., Misra M. A review of biodegradable thermoplastic starches, their blends and composites: recent developments and opportunities for single-use plastic packaging alternatives // Green Chem. 2022. № 24. P. 8606–8636.
- 8 Литвяк В. и др. Исследование особенностей механизма химической модификации крахмала // Наука и инновации. 2012. № 9. С. 64–69.
- 9 Palviainen P. et al. Corn starches as film formers in aqueous-based film coating // Pharm Dev Technol. 2001. № 6(3). P. 353–361.
- 10 Соломин Д.А. Целесообразность и эффективность производства модифицированных крахмалов // Пищевая промышленность. 2013. № 7. С. 54–56.
- 11 Степычева Н.В., Кучеренко П.Н. Использование амилолитических ферментных препаратов для замедления ретроградации крахмала // Химия и химическая технология. 2013. Т. 56 (8). С. 3–10.
- 12 European Bioplastics // Bioplastics market development update. 2021.

- 13 Мирзоирова В.А., Мухамедиев М.Г. Получение биоразлагаемых композиционных пленок на основе крахмала и поливинилового спирта // *Universum: химия и биология*. 2022. № 11–2 (101). С. 5–10.
- 14 Zhang W., Azizi-Lalabadi M., Jafarzadeh S., Jafari S.M. Starch-gelatin blend films: A promising approach for high-performance degradable food packaging // *Carbohydr Polym.* 2023. №. 15. P. 121266.
- 15 Роговина С.З., Алексанян К.В., Владимиров Л.В., Берлин А.А. Биоразлагаемые полимерные материалы на основе полилактида. *Химическая физика*. 2019. Т. 38. № 9. С. 39–46.
- 16 Роговина С.З. и др. Композиции на основе крахмала и полилактида // *Высокомолекулярные соединения (серия Б)*. 2019. Т. 61. № 3. С. 226–232.
- 17 Godbole S., Gote S., Latkar M., Chakrabarti T. Preparation and characterization of biodegradable poly-3-hydroxybutyrate-starch blend films // *Bioresour Technol.* 2003. V. 86. № 1. P. 33–37.
- 18 Крякунова Е.В., Манахова Т.Н., Канарская З.А., Михайлова О.С. и др. Влияние пластификаторов на физико-механические свойства пленочных материалов на основе крахмала // *Вестник Казанского технологического университета*. 2013. Т. 16. № 22. С. 225.
- 19 Фадеева И.В. и др. Плёнки из частично сшитого крахмала с фосфатами кальция // *Перспективные материалы*. 2016. № 10. С. 48–55.
- 20 Закирова А.Ш., Манахова Т.Н., Канарский А.В., Канарская З.А. Влияние ферментативной обработки горохового крахмала на физико-механические свойства био пленок // *Вестник ВГУИТ*. 2013. №. 2 (56). С. 187–190. doi: 10.20914/2310-1202-2013-2-187-190

References

- 1 Studenikina L.N., Domareva S.Yu., Golenskikh Yu.E., Matveeva A.V. Features of highly filled composites based on various grades of polyvinyl alcohol. *Proceedings of VSUET*. 2021. vol. 83. no. 1 (87). pp. 316–322. (in Russian).
- 2 Khabibullina L.F., Sidorov Yu.D., Polivanov M.A., Vasilenko S.V. Properties of composite film materials based on polyvinyl alcohol. *Bulletin of Kazan Technological University*. 2016. no. 21. pp. 109–113. (in Russian).
- 3 Studenikina L.N., Korchagin V.I., Popova L.V., Savvin P.N. Biodegradation of binary composites based on polyvinyl alcohol // *Journal of the Siberian Federal University. Series: Chemistry*. 2021. vol. 14. no. 1. pp. 111–119. (in Russian).
- 4 Julinová M., Vaňharová L., Jurca M. Water-soluble polymeric xenobiotics – Polyvinyl alcohol and polyvinylpyrrolidone – And potential solutions to environmental issues. A brief review. *Journal of Environmental Management*. 2018. no. 228. pp. 213–222.
- 5 Poddenezhny E.N., Boyko A.A., Alekseenko A.A., Drobyshvskaya N.E. et al. Progress in obtaining biodegradable composite materials based on starch (review). *Bulletin of GGTU named after P.O. Sukhoi*. 2015. no. 2. pp. 31–41. (in Russian).
- 6 Kabdrakhmanova Sana K. et al. Synthesis, characteristics and antibacterial activity of polymeric films based on starch and polyvinyl alcohol. *Journal of chemical technology and metallurgy*. 2018. no. 1. pp. 50–60.
- 7 Surendren A., Mohanty A.K., Liu Q., Misra M. A review of biodegradable thermoplastic starches, their blends and composites: recent developments and opportunities for single-use plastic packaging alternatives. *Green Chem.* 2022. no. 24. pp. 8606–8636.
- 8 Litvyak V. et al. Study of the features of the mechanism of chemical modification of starch. *Science and Innovation*. 2012. no. 9. pp. 64–69. (in Russian).
- 9 Palviainen P. et al. Corn starches as film formers in aqueous-based film coating. *Pharm Dev Technol.* 2001. no. 6(3). pp. 353–361.
- 10 Solomin D.A. Feasibility and efficiency of production of modified starches. *Food industry*. 2013. no. 7. pp. 54–56. (in Russian).
- 11 Stepycheva N.V., Kucherenko P.N. Use of amylolytic enzyme preparations to slow down starch retrogradation. *Chemistry and chemical technology*. 2013. vol. 56 (8). pp. 3–10. (in Russian).
- 12 European Bioplastics. Bioplastics market development update. 2021.
- 13 Mirzoirova V.A., Mukhamediyev M.G. Production of biodegradable composite films based on starch and polyvinyl alcohol. *Universum: chemistry and biology*. 2022. no. 11–2 (101). pp. 5–10. (in Russian).
- 14 Zhang W., Azizi-Lalabadi M., Jafarzadeh S., Jafari S.M. Starch-gelatin blend films: A promising approach for high-performance degradable food packaging. *Carbohydr Polym.* 2023. no. 15. pp. 121266.
- 15 Rogovina S.Z., Aleksanyan K.V., Vladimirov L.V., Berlin A.A. Biodegradable polymeric materials based on polylactide. *Chemical Physics*. 2019. vol. 38. no. 9. pp. 39–46. (in Russian).
- 16 Rogovina S.Z. et al. Starch and polylactide-based compositions. *High-molecular compounds (series B)*. 2019. vol. 61. no. 3. pp. 226–232. (in Russian).
- 17 Godbole S., Gote S., Latkar M., Chakrabarti T. Preparation and characterization of biodegradable poly 3 hydroxybutyrate-starch blend films. *Bioresour Technol.* 2003. vol. 86. no. 1. pp. 33–37.
- 18 Kryakunova E.V., Manakhova T.N., Kanarskaya Z.A., Mikhailova O.S. et al. Effect of plasticizers on the physicomechanical properties of starch-based film materials. *Bulletin of Kazan Technological University*. 2013. vol. 16. no. 22. pp. 225. (in Russian).
- 19 Fadeeva I.V. et al. Films from partially cross-linked starch with calcium phosphates. *Advanced Materials*. 2016. no. 10. pp. 48–55. (in Russian).
- 20 Zakirova A.Sh., Manakhova T.N., Kanarsky A.V., Kanarskaya Z.A. Effect of enzymatic treatment of pea starch on the physicomechanical properties of biofilms. *Proceedings of VSUET*. 2013. no. 2 (56). pp. 187–190. doi: 10.20914/2310-1202-2013-2-187-190 (in Russian).

Сведения об авторах

Любовь Н. Студеникина к.т.н., доцент, кафедра промышленной экологии и техносферной безопасности, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, lov-churkina@ya.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-6613-4974>

Игорь В. Коленко студент, кафедра промышленной экологии и техносферной безопасности, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, kolenko.igor.55@gmail.com

Вероника Е. Углова студент, кафедра промышленной экологии и техносферной безопасности, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, veronika200312@gmail.com

Александр А. Мельников студент, кафедра промышленной экологии и техносферной безопасности, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, melnikov.shura@inbox.ru

Вклад авторов

Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about authors

Lyubov N. Studenikina Cand. Sci. (Engin.), associate professor, industrial ecology and technosphere safety department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, lov-churkina@ya.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-6613-4974>

Igor V. Kolenko student, industrial ecology and technosphere safety department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, kolenko.igor.55@gmail.com

Veronika E. Uglova student, Voronezh State University of Engineering Technologies, industrial ecology and technosphere safety department, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, veronika200312@gmail.com

Alexandr A. Melnikov student, industrial ecology and technosphere safety department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, melnikov.shura@inbox.ru

Contribution

All authors are equally involved in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 18/04/2024	После редакции 13/05/2024	Принята в печать 03/06/2024
Received 18/04/2024	Accepted in revised 13/05/2024	Accepted 03/06/2024