

## Исследование физико-механических характеристик биокomпозитов с наполнителем из древесной муки

Н.Р. Галяветдинов<sup>a</sup>, Р.Р. Сафин<sup>b</sup>, Г.Ф. Илалова<sup>c</sup>, А.А. Прокопьев<sup>d</sup>

Казанский национальный исследовательский технологический университет,  
ул. Карла Маркса, 68, Казань, Республика Татарстан

<sup>a</sup> [nour777@mail.ru](mailto:nour777@mail.ru), <sup>b</sup> [cfaby@mail.ru](mailto:cfaby@mail.ru), <sup>c</sup> [achtung.guzik@mail.ru](mailto:achtung.guzik@mail.ru), <sup>d</sup> [prokopev.anatolij@mail.ru](mailto:prokopev.anatolij@mail.ru)

<sup>a</sup> <https://orcid.org/0000-0003-4360-7112>, <sup>b</sup> <https://orcid.org/0000-0002-0226-4232>,

<sup>c</sup> <https://orcid.org/0000-0002-9447-1684>, <sup>d</sup> <https://orcid.org/0009-0008-8106-364X>

Статья поступила 12.09.2023, принята 22.09.2023

*Пластик — это широко распространенный синтетический материал, ставший незаменимым в самых разных отраслях промышленности и повседневной жизни. Мировое производство пластика уже в значительной степени превысило производство таких материалов, как бумага, текстиль, и алюминий. Однако широкое производство, использование и утилизация пластика стали серьезной угрозой для окружающей среды. Экологические проблемы требуют принятия мер по более рациональному жизненному циклу пластмасс, от производства до переработки, и развития экодружественных материалов. Негативное влияние роста пластиковых отходов можно уменьшить общими усилиями власти, предприятий и граждан. В контексте современной концепции устойчивого развития проблема сокращения отходов особенно актуальна. Чтобы оставить будущим поколениям достойное экологическое наследие, необходимо принимать серьезные технологические и финансовые меры. Целью данного исследования является анализ ключевых моментов влияния пластиковых отходов на окружающую среду и определение путей для сведения к минимуму вредных последствий. Отмечается, что основные свойства полимерных композитов зависят от характеристик самой полимерной матрицы, а также состава дисперсного наполнителя и их соотношения. Выявлено, что при содержании более 40 % наполнителей в полимерном композите его физико-механические свойства снижаются. Также в работе представлены результаты изучения сорбционных свойств исследуемых композитов. На основании результатов эксперимента установлено, что композиционные материалы с наполнителем из древесной муки по исследуемым сорбционным параметрам лишь незначительно уступают своим аналогам без наполнителей.*

**Ключевые слова:** биоразлагаемый полимер; композит; древесный наполнитель; полигидроксибутират.

## Investigation of physical and mechanical characteristics of composites with wood flour filler

N.R. Galyavetdinov<sup>a</sup>, R.R. Safin<sup>b</sup>, G.F. Ilalova<sup>c</sup>, A.A. Prokopiev<sup>d</sup>

Kazan National Research Technological University; 68, Karl Marks St., Kazan, Republic of Tatarstan

<sup>a</sup> [nour777@mail.ru](mailto:nour777@mail.ru), <sup>b</sup> [cfaby@mail.ru](mailto:cfaby@mail.ru), <sup>c</sup> [achtung.guzik@mail.ru](mailto:achtung.guzik@mail.ru), <sup>d</sup> [prokopev.anatolij@mail.ru](mailto:prokopev.anatolij@mail.ru)

<sup>a</sup> <https://orcid.org/0000-0003-4360-7112>, <sup>b</sup> <https://orcid.org/0000-0002-0226-4232>,

<sup>c</sup> <https://orcid.org/0000-0002-9447-1684>, <sup>d</sup> <https://orcid.org/0009-0008-8106-364X>

Received 12.09.2023, accepted 22.09.2023

*Plastic is a widespread synthetic material that has become indispensable in a wide variety of industries and everyday life. Global plastic production has already largely exceeded the production of materials such as paper, textiles, and aluminum. However, the widespread production, use and disposal of plastic has become a serious threat to the environment. Environmental problems require taking measures for a more rational life cycle of plastics (from production to processing) and the development of eco-friendly materials. The negative impact of the growth of plastic waste can be reduced by the joint efforts of the government authorities, enterprises and citizens. In the context of the modern concept of sustainable development, the problem of waste reduction is particularly relevant. To leave a worthy environmental legacy for future generations, it is necessary to take serious technological and financial measures. The purpose of this study is to analyze the key points of the impact of plastic waste on the environment and identify ways to minimize harmful effects. It is noted that the main properties of polymer composites depend on the characteristics of the polymer matrix itself, as well as the composition of the dispersed filler and their ratio. It is revealed that when the content of fillers in a polymer composite is more than 40%, its physical and mechanical properties decrease. The paper also presents the results of a study of the sorption properties of the studied composites. Based on the experimental results obtained, it is found that composite materials with wood flour filler are slightly inferior to their analogues without fillers according to the sorption parameters studied.*

**Key words:** biodegradable polymer; composite; wood filler; PGB, polyhydroxybutyrate.

**Введение.** В последние десятилетия во всем мире очевиден значительный прогресс в материалах, которые делают нашу повседневную жизнь удобной. Одним из таких революционных материалов в современном мире являются полимеры [1–5]. Это материалы, содержащие большие молекулы, полученные путем связывания (химического соединения) ряда строительных блоков, называемых мономерами. Полимеры присутствуют почти во всех аспектах современной жизни из-за их широкого спектра свойств. Натуральные полимеры, такие как шерсть, хлопок и шелк, появились в нашей жизни задолго до появления самого понятия «полимер». Первый синтетический полимер был изобретен в 1869 г. Джоном Уэсли Хаяттом, который сделал первый заменитель бильярдных шаров из слоновой кости. Только в 1907 г. полимеры вошли в промышленный сектор с изобретением бакелита, первого полностью синтетического пластика, не содержащего природных молекул. Однако с ростом потребления полимеров, стала возникать проблема утилизации большого объема отходов. Одним из решений данной проблемы является применение биodeградируемых полимеров [6–12].

Необходимо также отметить, что создание и повсеместное внедрение биodeградируемых полимерных композитов несет за собой не только экологические, но и экономические преимущества [13–17]:

- переработка и утилизация большого объема полимерных отходов, объемы которых ежегодно увеличиваются;
- снижение себестоимости биополимеров из возобновляемого сырья;
- уменьшение потребления недеградируемых полимеров и композитов, отрицательно влияющих на экологию;
- уменьшение парниковых газов на 15–60 % с переходом на биоразлагаемые полимеры и композиты.

*Целью поставленной работы* является поиск решений по замене синтетических полимерных материалов на их экологичные биоразлагаемые аналоги. Поэтому задачей работы являлось исследование механических свойств биоразлагаемых композитов. В данной статье представлены основные параметры биodeградируемых материалов на основе полигидроксibuтерата (ПГБ). Представлен сравнительный анализ прочностных и сорбционных свойств полимерных композиционных материалов. Сравнительный анализ исследуемых материалов проводился по следующим параметрам: водопоглощение и деформационно-прочностные характеристики: предела прочности, модуля упругости, ударной вязкости и твердости [18–20].

В настоящей работе рассмотрена совместимость компонентов в композитах на основе биоразлагаемого полимера ПГБ, и древесного наполнителя; исследованы их прочностные свойства, определена их сорбционная способность (вдoпоглощение), которая является одним из ключевых факторов биоразложения под влиянием микроорганизмов во влажной почве. Такой подход позволяет исследовать основные специфические особенности поведения исследуемых материалов.

**Объекты и методы исследования.** В качестве наполнителя использовали древесную муку древесины березы марки 180, соответствующую ГОСТ 16361-87. В

качестве полимерного связующего использовали полигидроксibuтерат (ПГБ).

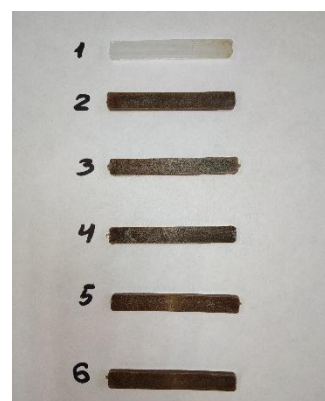
Для исследования прочностных характеристик были получены образцы специальной формы (рис. 1), для получения которых использовалась инъекционная литьевая машина для пробоподготовки (рис. 2). Для сравнения прочностных характеристик в работе приводятся данные свойств образцов чистых полимерных материалов из ПГБ.

Получение композитов с 70%-ным содержанием древесной муки не представляется возможным ввиду очевидного недостатка связующего, из-за чего композит получался хрупким.

Состав композиций представлен в табл. 1.

**Таблица 1.** Составы композитов из древесной муки и ПГБ

№	ПГБ, %	Древесная мука, %
1	100	0
2	80	20
3	70	30
4	60	40
5	50	50
6	40	60



**Рис. 1.** Образцы композитов из древесной муки и ПГБ: 1 — ПГБ/ДМ (100/0); 2 — ПГБ/ДМ (80/20); 3 — ПГБ/ДМ (70/30); 4 — ПГБ/ДМ (60/40); 5 — ПГБ/ДМ (50/50); 6 — ПГБ/ДМ (40/60)



**Рис. 2.** Инъекционная литьевая машина для пробоподготовки

Исследования композитов на предел прочности на растяжение и модуль упругости были проведены на универсальной разрывной машине (рис. 3). В результате испытаний образцов был определен предел прочности, при которой происходит разрушение образцов.



Рис. 3. Универсальная разрывная машина JLTC LDS-5L

Определение ударной вязкости образцов композита проводилось по методу Шарпи ГОСТ 1.0-2015. Испытания осуществлялись на маятниковой машине UGT-7045-MDL (рис. 4). Данный метод представляет собой работу разрушения при высокой скорости деформирования, соответствующей удару, при котором образец укладывался по центру на опоры напротив двух упоров. Закрепленные образцы без надреза разрушались маятником с энергией удара со скоростью движения 4,1 м/с и при угле падения 160°.



Рис. 4. Маятниковая машина UGT-7045-MDL

Твердость композитов определяли на твердомере HD 3000 (рис. 5), который представляет собой стрелочный дюрометр, предназначенный для измерения значений твердости низко модульных материалов в единицах Shore D методом вдавливания. Данный метод позволяет

измерять глубину начального вдавливания, а также глубину вдавливания после заданных периодов времени.

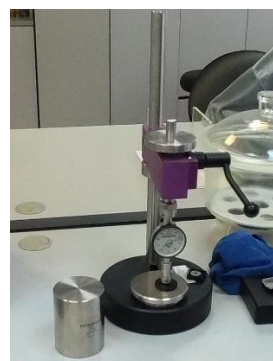


Рис. 5. Твердомер HD 3000

Для определения значений водопоглощения композитного материала образцы для испытаний изготавливали из заготовок в виде пластин прямоугольного сечения методом штамповки в специальном вырубном штампе (рис. 6).



Рис. 6. Гидравлический формовочный пресс Gotech GT-7014-N

Перед проведением серий испытаний на водопоглощение материала из предварительно изготовленных пластин вырезались образцы в виде квадрата со стороной 30\*30 мм и толщиной 1 мм (рис. 7), которые подвергались дальнейшей сушке в вакуумно-сушильном шкафу Memmert 400 в течение 12 ч при постоянной температуре 100±5 °С до постоянной массы.

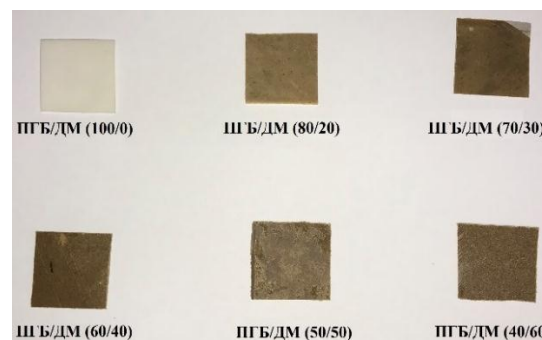
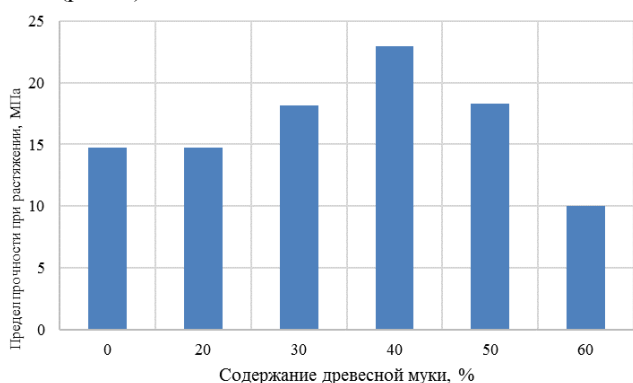


Рис. 7. Образцы композита для испытания на водопоглощение

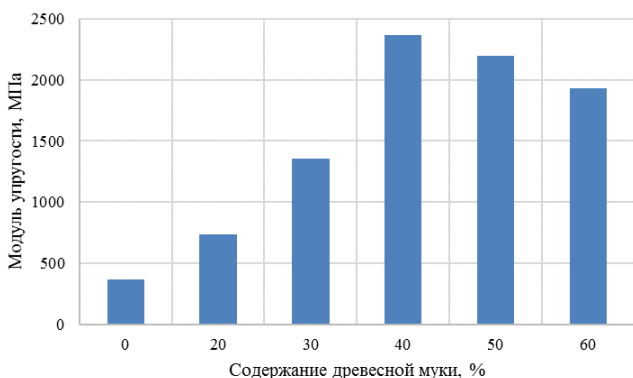
Определение водопоглощения композитов производилось методом погружения исследуемых образцов в дистиллированную воду в эксикаторе. По истечении заданного промежутка времени, образцы извлекались и взвешивались на аналитических электронных весах.

**Результаты исследования.** Важнейшими показателями композитов является их предел прочности на растяжение и модуль упругости. В процессе исследований были получены графики, показывающие сравнительные пределы прочности на растяжение и модуля упругости композитов, зависящие от количества наполнителя в композите.

Определение показателей прочности при растяжении древесно-полимерных композитных материалов позволяет сделать вывод о том, что содержание наполнителя в образцах до 40 % приводит к плавному росту предела прочности, поэтому, изменяя состав композита, можно улучшить прочность материала, добиваясь при этом результата, превосходящего показатели чистого ПГБ. При 40%-ном содержании наполнителя значение предела прочности на растяжение оказалось максимальным (рис. 8).



**Рис. 8.** Влияние состава композита на прочность образцов при испытании на растяжение



**Рис. 9.** Влияние состава композита на модуль упругости образцов



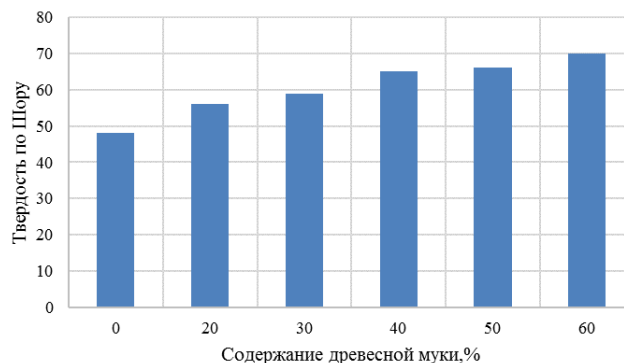
**Рис. 10.** Влияние состава композита на ударную вязкость образцов

Что касается модуля упругости, то данный показатель увеличивается с ростом наполнителя. Данный фактор доказывает, что чем выше модуль упругости напол-

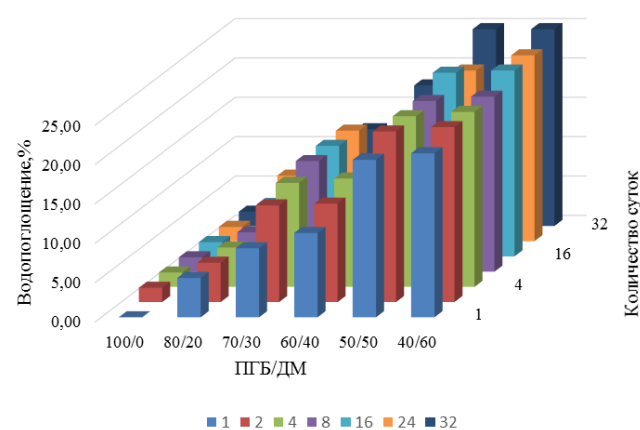
нителя и степень наполнения, тем больше деформационная устойчивость материала (рис. 9).

Что касается ударной вязкости, было обнаружено, что введение дисперсного наполнителя в композит приводит к снижению ударной вязкости по сравнению с исходным полимером без содержания наполнителя (рис. 10).

Исследование твердости образцов показало (рис. 11), что твердость образцов с увеличением объемной доли наполнения возрастает.



**Рис. 11.** Влияние состава композита на твердость по Шору



**Рис. 12.** Влияние состава композита на водопоглощение образцов

В отличие от абсолютного большинства синтетических пластмасс биоразлагаемые полимеры могут расщепляться в условиях окружающей среды путем реакций гидролиза и окисления, а также с участием различных микроорганизмов. Поэтому одним из важных факторов, влияющими на биоразложение полимера и его эрозию, является водопоглощение композита. С этой целью были проведены испытания образцов на водопоглощение (по массе) (рис. 12).

По полученным результатам можно сделать вывод, что оптимальным соотношением ПГБ/ДМ является состав с 60%-ным содержанием древесной муки, а дальнейшее увеличение наполнителя приводит к кратному увеличению показателя водопоглощения композита.

**Заключение.** Были сделаны следующие выводы:

1. Проведенные исследования биоразлагаемых композитов позволили установить, что производство изделий из биоразлагаемых композитов позволят найти пути рационального использования неликвидных отходов деревообработки и за счет этого снизить себестоимость производства биоразлагаемых композитов, а также при

этом сохранить его удовлетворительные упруго-прочностные характеристики.

2. Показатели прочности образцов при растяжении позволяют сделать вывод, что при наилучшем результате был получен при 40%-ном содержании композита (23 МПа). При 30 и 50 % получены аналогичные результаты (17 МПа), а при 60 % падение прочности по сравнению с другими составами произошло практически в 2 раза.

3. Значения модуля упругости росли с увеличением содержания древесной муки (до 2 364 МПа для ПГБ/ДМ (40/60)), однако с дальнейшим увеличением содержания древесной муки в композите показатель модуля упругости начинает снижаться и для композита ПГБ/ДМ (60/40) составляет 1 932 МПа.

4. Наилучший результат при определении значения ударной вязкости был получен для состава с 20%-ным содержанием наполнителя (12 500 Дж/м<sup>2</sup>), а для остальных составов разница была не столь существенной (кроме образца с чистым ПГБ).

#### Литература

1. Прокопьев А.А., Салимгараева Р.В., Сафин Р.Р. Обзор современных исследований в области ацетилования древесины // *Деревообрабатывающая пром-сть*. 2022. № 2. С. 106-114.
2. Прокопьев А.А., Салимгараева Р.В., Сафин Р.Р. Исследование свойств ацетилованной древесины // *Деревообрабатывающая пром-сть*. 2023. № 1. С. 86-90.
3. Сафин Р.Р., Галяветдинов Н.Р., Гараева А.Ф. Влияние высокотемпературной обработки на химический состав древесного наполнителя // *Деревообрабатывающая пром-сть*. 2016. № 1. С. 50-55.
4. Галяветдинов Н.Р., Талипова Г.А., Сафин Р.Р., Мухаметзянов Ш.Р. Разработка древесно-наполненного композитного состава для 3D-принтеров // *Деревообрабатывающая пром-сть*. 2019. № 1. С. 33-39.
5. Илалова Г.Ф., Саерова К.В., Сафин Р.Р., Мухаметзянов Ш.Р., Сафиуллина А.Х. Исследование высокотемпературного гидролиза соснового опила сернистой кислотой с целью увеличения выхода редуцирующих веществ // *Деревообрабатывающая пром-сть*. 2020. № 3. С. 71-80.
6. Галяветдинов Н.Р., Сабирова Г.А., Хайруллин Р.З., Сафин Р.Р., Илалова Г.Ф. Исследование скорости деградации древесно-наполненных PLA композитов в кислых и щелочных растворах // *Деревообрабатывающая пром-сть*. 2019. № 4. С. 62-68.
7. Галяветдинов Н.Р., Илалова Г.Ф., Саерова К.В., Погодина Я.Д. Технология производства биоразлагаемых композитов для сельскохозяйственных целей // *Деревообрабатывающая пром-сть*. 2022. № 3. С. 73-82.
8. Мухтарова А.Р., Илалова Г.Ф. Усовершенствование технологии производства древесно-полимерного композита путем термической обработки наполнителя // *Наука и образование в области технической эстетики, дизайна и технологии художественной обработки материалов: материалы X Междунар. науч.-практической конф. вузов России (23-28 апр. 2018 г.)*. СПб., 2018. С. 165-169.
9. Safin R.R., Ilalova G.F., Khasanshin R.R. Study of pyrolysis of annual crop refuse under reduced pressure // *Solid State Phenomena*. 2020. V. 299. P. 974-979.
5. Результаты определения твердости по Шору показали линейный рост для всех образцов композита — с 49 до 70 для композитов с содержанием древесной муки березы соответственно от 20 до 60 %.
6. Испытание на водопоглощение (по массе) образцов показало, что наиболее низкие сорбционные показатели имеют чистые полимерные материалы, показатель водопоглощения растет с ростом содержания наполнителя.

Таким образом, можно сказать, что поставленные в ходе работы цели были выполнены, и был выявлен оптимальный состав композита. Определено, что для получения биокомпозитов с высокими физико-механическими показателями, оптимальным составом композита будет являться 40%-ное содержание наполнителя.

Работа выполнена при поддержке гранта Академии наук Республики Татарстан (01-12-яГ).

10. Ilalova G., Safin R., Mukhametzhanov S., Gazizullina A. Hydrolysis as a basis for processing vegetable waste into bioplastics // *E3S Web of Conferences. Ser. «Energy Systems Environmental Impacts, ESEI 2020»*, 2020. P. 03009.
11. Reeta Rani Singhania, Anil Kumar Patela, Mei-Ling Tsaib, Chiu-Wen Chena, Cheng Di Dong. Genetic modification for enhancing bacterial cellulose production and its applications // *Bioengineered*. 2021. V. 12. № 1. P. 6793-6807.
12. Naoto Tonouchi, Sueharu Horinouchi, Takayasu Tsuchida, Fumihito Yoshinaga. Increased Cellulose Production from Sucrose by Acetobacter after Introducing the Sucrose Phosphorylase Gene // *Bioscience, Biotechnology, Biochemistry*. 1998. V. 62, iss. 9. P. 1778-1780.
13. Muhammad Imran Din, Tayabba Ghaffar, Jawayria Najeeb, Zaib Hussain, Rida Khalid, Hafsa Zahid. Potential perspectives of biodegradable plastics for food packaging application-review of properties and recent developments // *Food Additives Contaminants: Part A*. 2020. P. 1-16.
14. Clement Matthew Chan, Luigi-Jules Vandi, Steven Pratt, Peter Halley, Desmond Richardson, Alan Werker, Bronwyn Laycock. Composites of Wood and Biodegradable Thermoplastics: A Review, *Polymer Reviews*. 2018. 58:3. P. 444-449.
15. Antonio U.B. Queiroz, Fernanda P. Collares-Queiroz. Innovation and Industrial Trends in Bioplastics, *Polymer Reviews*. 2009. 49:2. P. 65-78.
16. Rozman H.D., Kumar R.N., Adlli M.R.M., Abusamah A., Mohd Ishak Z.A. The Effect of Lignin and Surface Activation on the Mechanical Properties of Rubberwood-Polypropylene Composites // *Journal of Wood Chemistry and Technology*. 1998. 18:4. P. 471-490.
17. Triwulandari Evi, Ghazali Muhammad, Sondari Dewi, Septiyanti Melati, Sampora Yulianti, Meliana Yenny, Fahmiati Sri, Kartika Restu Witta, Haryono Agus. Effect of lignin on mechanical, biodegradability, morphology, and thermal properties of polypropylene / polylactic acid / lignin biocomposite, *Plastics, Rubber and Composites*. 2019. 48:2. P. 82-92.
18. Vilarinho Fernanda, Sanches-Silva Ana, Fátima Vaz M., Paulo Farinha José. Nanocellulose: a benefit for green food packaging, *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2017. P. 1-46.
19. Rahman Mohammed Mahabubur, Tsukamoto Jiro, Md. Motiur Rahman, Aogu Yoneyama, Kamal Mohammad Mostafa. Lignin and its effects on litter decomposition in forest ecosystems, *Chemistry and Ecology*. 2013. 29:6. P. 540-553.

20. Velichko Hristov. Melt Flow Instabilities of Wood Polymer Composites, Composite Interfaces. 2009. 16:7-9. P. 731-750.

#### References

1. Prokop'ev A.A., Salimgaraeva R.V., Safin R.R. Review of modern research in the field of wood acetylation // *Derevoobrabativalnaya promishlennost'* (Woodworking industry). 2022. № 2. P. 106-114.
2. Prokop'ev A.A., Salimgaraeva R.V., Safin R.R. Investigation of the properties of acetylated wood // *Derevoobrabativalnaya promishlennost'* (Woodworking industry). 2023. № 1. P. 86-90.
3. Safin R.R., Galyavetdinov N.R., Garaeva A.F. The effect of high-temperature treatment on the chemical composition of wood filler // *Derevoobrabativalnaya promishlennost'* (Woodworking industry). 2016. № 1. P. 50-55.
4. Galyavetdinov N.R., Talipova G.A., Safin R.R., Muhametzyanov S.H.R. Development of wood-filled composite composition for 3D printers // *Derevoobrabativalnaya promishlennost'* (Woodworking industry). 2019. № 1. P. 33-39.
5. Ilalova G.F., Saerova K.V., Safin R.R., Muhametzyanov S.H.R., Safiullina A.H. Investigation of high-temperature hydrolysis of pine sawdust with sulfurous acid in order to increase the yield of reducing substances // *Derevoobrabativalnaya promishlennost'* (Woodworking industry). 2020. № 3. P. 71-80.
6. Galyavetdinov N.R., Sabirova G.A., Hajrullin R.Z., Safin R.R., Ilalova G.F. Investigation of the degradation rate of wood-filled PLA composites in acidic and alkaline solutions // *Derevoobrabativalnaya promishlennost'* (Woodworking industry). 2019. № 4. P. 62-68.
7. Galyavetdinov N.R., Ilalova G.F., Saerova K.V., Pogodina YA.D. Technology of production of biodegradable composites for agricultural purposes // *Derevoobrabativalnaya promishlennost'* (Woodworking industry). 2022. № 3. P. 73-82.
8. Muhtarova A.R., Ilalova G.F. Improvement of the technology of production of wood-polymer composite by heat treatment of filler. In the collection: Science and education in the field of technical aesthetics, design and technology of artistic processing of materials // *Nauka i obrazovanie v oblasti tekhnicheskoy estetiki, dizajna i tekhnologii hudozhestvennoj obrabotki materialov: materialy X Mezhdunar. nauch.-prakticheskoy konf. vuzov Rossii* (23-28 apr. 2018 g.). SPb., 2018. P. 165-169.
9. Safin R.R., Ilalova G.F., Khasanshin R.R. Study of pyrolysis of annual crop refuse under reduced pressure // *Solid State Phenomena*. 2020. V. 299. P. 974-979.
10. Ilalova G., Safin R., Muhametzyanov S., Gazizullina A. Hydrolysis as a basis for processing vegetable waste into bioplastics // *E3S Web of Conferences*. Ser. «Energy Systems Environmental Impacts, ESEI 2020», 2020. P. 03009.
11. Reeta Rani Singhania, Anil Kumar Patela, Mei-Ling Tsaib, Chiu-Wen Chena, Cheng Di Dong. Genetic modification for enhancing bacterial cellulose production and its applications // *Vioengineered*. 2021. V. 12. № 1. P. 6793-6807.
12. Naoto Tonouchi, Sueharu Horinouchi, Takayasu Tsuchida, Fumihiro Yoshinaga. Increased Cellulose Production from Sucrose by Acetobacter after Introducing the Sucrose Phosphorylase Gene // *Bioscience, Biotechnology, Biochemistry*. 1998. V. 62, iss. 9. P. 1778-1780.
13. Muhammad Imran Din, Tayabba Ghaffar, Jawayria Najeeb, Zaib Hussain, Rida Khalid, Hafsa Zahid. Potential perspectives of biodegradable plastics for food packaging application-review of properties and recent developments // *Food Additives Contaminants: Part A*. 2020. P. 1-16.
14. Clement Matthew Chan, Luigi-Jules Vandi, Steven Pratt, Peter Halley, Desmond Richardson, Alan Werker, Bronwyn Laycock. Composites of Wood and Biodegradable Thermoplastics: A Review, *Polymer Reviews*. 2018. 58:3. P. 444-449.
15. Antonio U.B. Queiroz, Fernanda P. Collares-Queiroz. Innovation and Industrial Trends in Bioplastics, *Polymer Reviews*. 2009. 49:2. P. 65-78.
16. Rozman H.D., Kumar R.N., Adlli M.R.M., Abusamah A., Mohd Ishak Z.A. The Effect of Lignin and Surface Activation on the Mechanical Properties of Rubberwood-Polypropylene Composites // *Journal of Wood Chemistry and Technology*. 1998. 18:4. P. 471-490.
17. Triwulandari Evi, Ghozali Muhammad, Sondari Dewi, Septiyanti Melati, Sampora Yulianti, Meliana Yenny, Fahmiati Sri, Kartika Restu Witta, Haryono Agus. Effect of lignin on mechanical, biodegradability, morphology, and thermal properties of polypropylene / polylactic acid / lignin biocomposite, *Plastics, Rubber and Composites*. 2019. 48:2. P. 82-92.
18. Vilarinho Fernanda, Sanches-Silva Ana, Fátima Vaz M., Paulo Farinha José. Nanocellulose: a benefit for green food packaging, *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2017. P. 1-46.
19. Rahman Mohammed Mahabubur, Tsukamoto Jiro, Md. Motiur Rahman, Aogu Yoneyama, Kamal Mohammad Mostafa. Lignin and its effects on litter decomposition in forest ecosystems, *Chemistry and Ecology*. 2013. 29:6. P. 540-553.
20. Velichko Hristov. Melt Flow Instabilities of Wood Polymer Composites, Composite Interfaces. 2009. 16:7-9. P. 731-750.