

9. Melekhov V.I., Solov'ev I.I., Prohorov V.V., Tyurikova T.V. Method of gluing wood: pat. № RU2715840 C1 / № 2019123090; заяв. 22.07.2019; opubl. 03.03.2020.
10. Prohorov V.V. The use of induction heating when gluing wood products in the shipbuilding industry // Nauch.-tekhnicheskie vedomosti Sevmashvuzta. 2016. № 1. P. 28-31.
11. Prohorov V.V., Klyushin N.M., Voronin A.M. Experimental stand designed to study the process of gluing wood blanks // Nauch. al'manah. 2018. № 11-2 (49). P. 53-56.
12. Prohorov V.V., Klyushin N.M., Voronin A.M. Bonding mode and its effect on the quality of the adhesive joint // Nauch. al'manah. 2019. № 3-3 (53). P. 71-74.
13. Bursavich J., Abu-Laban M., Muley P.D., Boldor D., Hayes J.D. Thermal Performance and Surface Analysis of Steel-Supported Platinum Nanoparticles Designed for Bio-Oil Catalytic Upconversion During Radio Frequency-Based Inductive Heating. Energy Convers. Manage. 2019. 183. P. 689-697.
14. Ceylan S., Coutable L., Wegner J., Kirschning A. Inductive Heating with Magnetic Materials Inside Flow Reactors. Chem. Eur. J. 2011. 17. P. 1884-1893.
15. Ceylan S., Friese C., Lammel C., Mazac K., Kirschning A. Inductive Heating for Organic Synthesis by Using Functionalized Magnetic Nanoparticles Inside Microreactors. Angew. Chem., Int. Ed. 2008. 47. P. 8950-8953.
16. Prohorov V.V. Experimental investigation of the characteristics of ferromagnetic fillers introduced into the adhesive composition // Lomonosovskie nauchnye chteniya studentov, aspirantov i molodyh uchenyh: sb. materialov konf. (1-30 apr. 2021 g.). Arhangel'sk, 2021. P. 460-463.
17. Murzin V.S., Kantieva E.V., Ponomarenko L.V. The effectiveness of the use of fillers in the production of plywood on low-toxic carbomidoformaldehyde resins // Forestry Engineering Journal. 2012. № 3. P. 20-24.
18. Fil'chakov A.V., Agaverdyeva A.F. Fillers used in woodworking // Trudy Bratskogo gos. tekhnicheskogo un-ta. Bratsk: BrGTU, 2002. P. 116-120.
19. Sluhockij A.E. Inductors. 5-e izd., pererab. i dop. L.: Mashinostroenie, 1989. 69 p.
20. Sluhockij A.E., Nemkov V.S., Pavlov N.A., Bamuner A.V. Induction heating installations: textbook. handbook for universities. L.: Energoizdat, 1981. 328 p.
21. Ruta S., Chantrell R., Hovorka O. Unified Model of Hyperthermia via Hysteresis Heating in Systems of Interacting Magnetic Nanoparticles. Sci. Rep. 2015. 5. P. 9090.
22. Moses A.J. Eddy Current Losses in Soft Magnetic Materials. Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering; Wiley: 2016. P. 1-22.
23. Bordet A., Lacroix L.-M., Fazzini P.F., Carrey J., Soulantica K., Chaudret B. Magnetically Induced Continuous CO<sub>2</sub> Hydrogenation Using Composite Iron Carbide Nanoparticles of Exceptionally High Heating Power. Angew. Chem., Int. Ed. 2016. 55. P. 15894-15898.
24. Mortensen P.M., Ostberg M., Nielsen P.E. Induction Heating of Endothermic Reactions. WO2017/036794 A1, 2017.
25. Vinum M., Mortensen P.M. Ferromagnetic Materials for Induction Heated Catalysis. WO 2017/186608 A1, 2017.
26. Rosensweig R.E. Heating Magnetic Fluid with Alternating Magnetic Field. J. Magn. Magn. Mater. 2002. 252. P. 370-374.
27. Wang W., Tuci G., Viet C.D., Liu Y., Rossin A. Induction Heating: An Enabling Technology for the Heat Management in Catalytic Processes, ACS Catal. 2019. 9. P. 7921-7935.
28. Anishchenko A.V., Sidorov E.A., Fedotov N.M. Device for induction heating of ferromagnetic implants // Elektronnye sredstva i sistemy upravleniya. Materialy dokladov mezhdunar. nauch.-prakticheskoy konf. 2016. № 1-1. P. 171-173.
29. Frederikse H.P.R. Handbook of Chemistry and Physics; Properties of magnetic materials; CRC Press: Boca Raton, FL, 2009.
30. Sorokin V.G. Vintage of steels and alloys. M.: Mashinostroenie, 1989. 640 p.

УДК 678.13

DOI: 10.18324/2077-5415-2023-4-160-169

## Обзор свойств древесно-полимерных композитов на основе биоразлагаемых полимеров

К.Г. Анিকেева<sup>a</sup>, Р.Р. Сафин<sup>b</sup>

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

<sup>a</sup> doomksen@mail.ru, <sup>b</sup> cfaby@mail.ru

<sup>a</sup> <https://orcid.org/0009-0003-5128-0946>, <sup>b</sup> <https://orcid.org/0000-0002-0226-4232>

Статья поступила 09.10.2023, принята 26.10.2023

*Для получения древесно-полимерных композитов (ДПК) применяются различные наполнители и термопластичные связующие, при этом преимущественно используются синтетические полимеры этилена и пропилена, что приводит к неполному биоразложению ДПК, полученных на их основе. В результате бионеразлагаемые материалы, из-за своей устойчивости к микробному разложению, накапливаются в окружающей среде, что приводит к нарастающей опасности загрязнения среды. В связи с этим в различных странах вводятся ограничения по применению таких композиционных материалов в упаковке и автомобилестроении, следовательно, необходимо изучение сведений о биоразлагаемых полимерах и возможности их внедрения в древесные композиты. В статье представлен обзор современных исследований о биоразлагаемых полимерах и древесно-полимерных композитах на их основе. Установлена зависимость свойств ДПК от выбора полимерной матрицы и методов ее обработки. Существует множество источников биоразлагаемых пластиков, от синтетических до натуральных полимеров. Природные полимеры доступны в больших количествах из возобновляемых источников, тогда как синтетические полимеры производятся из невозобновляемых нефтяных ресурсов. Биodeградация полимерных биоматериалов включает расщепление гидролитически или ферментативно чувствительных связей в полимере, что приводит к эрозии полимера. В последнее время синтезировано огромное количество биоразлагаемых полимеров и идентифицированы некоторые микроорганизмы и ферменты, способные их разлагать.*

**Ключевые слова:** биоразлагаемые полимеры; древесно-полимерные композиты; свойства древесно-полимерных композитов.

# Review of the properties of wood-polymer composites based on biodegradable polymers

K.G. Anikeeva<sup>a</sup>, R.R. Safin<sup>b</sup>

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

<sup>a</sup> doomksen@mail.ru, <sup>b</sup> cfaby@mail.ru

<sup>a</sup> <https://orcid.org/0009-0003-5128-0946>, <sup>b</sup> <https://orcid.org/0000-0002-0226-4232>

Received 09.10.2023, accepted 26.10.2023

*To obtain wood-polymer composites (WPC), various fillers and thermoplastic binders are used, while synthetic polymers of ethylene and propylene are mainly applied, which leads to incomplete biodegradation of WPC obtained from them. As a result, biodegradable materials, due to their resistance to microbial decomposition, accumulate in the environment, which leads to an increasing danger of environmental pollution. In this regard, various countries are introducing restrictions on the use of such composite materials in packaging and the automotive industry; therefore, it is necessary to study information about biodegradable polymers and the possibility of their introduction into wood composites. The article provides an overview of modern research on biodegradable polymers and wood-polymer composites based on them. The dependence of the properties of WPC on the choice of polymer matrix and methods of its processing has been established. There are many sources of biodegradable plastics, ranging from synthetic to natural polymers. Natural polymers are available in large quantities from renewable sources, while synthetic polymers are produced from non-renewable petroleum resources. Biodegradation of polymeric biomaterials involves the breakdown of hydrolytically or enzymatically sensitive bonds in the polymer, resulting in polymer erosion. Recently, a huge number of biodegradable polymers have been synthesized and some microorganisms and enzymes capable of degrading them have been identified.*

**Keywords:** biodegradable polymers; wood-polymer composites; properties of wood-polymer composites.

**Введение.** В последние десятилетия древесно-полимерные композиты (ДПК) получили широкое распространение во всем мире, композиты имеют множество областей применения: от автомобильных деталей до компонентов строительных конструкций [1].

Обычно ДПК производят путем смешивания лигноцеллюлозных наполнителей, состоящих из целлюлозы, гемицеллюлозы и лигнина, с расплавленными полимерами и последующей обработкой до желаемой формы. Для коммерческих ДПК применяются полиолефины, такие как полиэтилен (ПЭ) и полипропилен (ПП), они являются экономичными и долговечными, а также имеют относительно низкую влагопроницаемость. В связи с тем, что ДПК на основе полиолефина представляют собой смесь синтетических и биологических материалов, их переработка является трудноосуществимым процессом, помимо этого, они не поддаются биологическому разложению.

Тенденция к замене традиционных полиолефинов в древесно-полимерных композитах на полностью возобновляемые и биоразлагаемые материалы наблюдается в последние годы по следующим причинам:

- повышен уровень беспокойства по поводу воздействия полимеров и композитов на окружающую среду;
- растет обеспокоенность по вопросам больших объемов отходов;
- существует необходимость снижения чрезмерной зависимости от химических ресурсов, добываемых из нефти;
- движение к экономике замкнутого цикла, которая заключается в переработке и повторном использовании существующих материалов настолько долго, насколько это возможно [2].

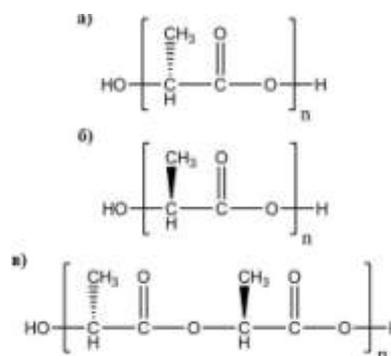
Для того, чтобы обеспечить полную биоразлагаемость композитов, в качестве матрицы для ДПК необходимо использовать биоразлагаемые полимеры. Однако их применение ограничено из-за сравнительно высокой стоимости, плохих влаго- и газонепроницаемости, плохой стабильности, медленной скорости кристаллизации и узких возможностей обработки [3]. Недостатками в применении биоразлагаемых полимеров являются высокая стоимость процесса производства, низкие механические свойства из-за несовместимости

древесины и полимера, требования к механической и физической стабильности (особенно в отношении влагопоглощения), отсутствие данных о скорости биоразлагаемости полимеров.

В настоящее время выделенные выше проблемы решаются с помощью текущих исследований, направленных на повышение экономической эффективности производственного процесса, обеспечение глубокого понимания всего процесса, от сырья до свойств, а также на разработку технологий для решения проблемы совместимости и стабильности [2].

**Свойства древесно-полимерных композитов на основе полимолочной кислоты.** Полимолочная кислота (ПМК), также известная как полилактид, представляет собой биоразлагаемый алифатический полиэфир, который широко используется в упаковочной и медицинской промышленности. Мономер, молочная кислота, может быть получен путем ферментации растительного сырья, такого как кукуруза и картофель. Существует три стереоизомера ПМК (рис. 1): кристаллизующиеся ПЛЛА (поли-Л-лактид) и ПДЛА (поли-Д-лактид), а также аморфный ПДЛЛА (поли-ДЛ-лактид) [4].

Полимолочная кислота впервые была синтезирована путем конденсационной полимеризации молочной кислоты, однако, используя данный способ, трудно получить высокомолекулярную ПМК с хорошими механическими свойствами.



**Рис. 1.** Химическая структура стереоизомеров ПМК: а — поли-Л-лактид (ПЛЛА); б — поли-Д-лактид (ПДЛА); в — поли-ДЛ-лактид (ПДЛЛА)

Благодаря обширным исследованиям была разработана полимеризация циклического лактида с раскрытием цикла для производства высокомолекулярной полимолочной кислоты [5]. Большинство коммерческих ПМК производятся методом полимеризации с раскрытием цикла с использованием технологии одностадийной реактивной экструзии. Было показано, что тип инициатора оказывает существенное влияние на скорость реакции и молекулярную массу полученной полимолочной кислоты. Из-за низкой себестоимости производства, высокой механической прочности и жесткости, а также водостойкости полимолочная кислота достаточно конкурентоспособна среди биоразлагаемых полимеров для композитных материалов [6].

Гомополимеры ПМК подвержены термическому разложению в результате гидролиза при температуре выше 200 °С, с температурой плавления около 175 °С. Поэтому гомополимеры ПМК имеют узкий диапазон обработки, однако это можно улучшить за счет включения энантиомеров лактида противоположной конфигурации для получения поли-ДЛ-лактида (ПДЛЛА), но это сопровождается уменьшением скорости кристаллизации и потерей механических свойств [7].

У полимолочной кислоты есть недостатки, например, удлинение при разрыве менее 10 %, что ограничивает ее использование в случаях, требующих гибкости при высоких нагрузках. Кроме того, ПМК имеет низкую скорость биоразложения, так как разлагается в основном за счет гидролиза и разрыва цепи, скорость гидролиза относительно низкая из-за присутствия алкильных групп, препятствующих воздействию воды. Также ПМК относительно устойчива к микроорганизмам в почве, поскольку существует мало природных ферментов, разлагающих ПМК, вырабатываемых почвенными бактериями [8]. Например, Окита и Ли не заметили разложения ПМК после 6 недель пребывания в почве [9]. Полимолочная кислота быстро разлагается в аэробной и анаэробной средах компостирования, полное биоразложение ПМК наблюдается через 40 дней в компосте при температуре 60 °С (т. е. выше температуры стеклования ПМК). Скорость биоразложения зависит от кристалличности полимолочной кислоты, повышенная кристалличность приводит к более медленному разложению [10]. В целом было обнаружено, что биоразлагаемость ПМК зависит от таких факторов, как среда утилизации, условия водонепроницаемости, молекулярная масса и кристалличность.

В работе Г.А. Сабировой и др. рассмотрено влияние температуры термической обработки древесного наполнителя на показатель текучести расплава (ПТР). Исследованы композитные материалы с 50%-ным содержанием наполнителя, который был высушен при 130 °С и термически модифицирован при 230 °С. Установлено, что повышение температуры обработки древесной муки (ДМ) ведет к росту ПТР [11].

Древесно-полимерные композиты на основе ПМК имеют лучшие механические свойства, чем композиты на основе полипропилена, однако превосходство свойств наблюдается только при температурах не выше +50 °С [12]. Исследования ДПК на основе полимолочной кислоты сосредоточены на оптимизации механических свойств. Так, согласно данным исследования, предел прочности ДПК на основе ПМК равен 37–71 МПа, модуль упругости 1,2–8,9 ГПа, удлинение при разрыве 1,0–3,1 % [13]. Древесный наполнитель оказывает влияние на улучшение жесткости древесно-полимерных композитов на основе полимолочной кислоты, при увеличении содержания наполнителя уменьшается удлинение при разрыве. Тип и происхождение наполнителя существенно влияют на свойства композита. В своем исследовании Пелтола и др. сравнивали свойства композитов на основе полимолочной кислоты и полипропилена, которые были армированы четырьмя видами древесных наполнителей: отбеленной крафт-целлюлозой из сосны, березы и эвкалипта, а также еловой целлюлозой и сосновой мукой [14]. Волокна в полимолочной кислоте диспергируются лучше, чем в полипропилене, это способствует увели-

чению предела прочности и модуля упругости, снижению ударной вязкости.

В работе А. Gregofova и др. наблюдалось увеличение модуля Юнга (3,73±0,247 ГПа) и снижение предела прочности (37,2±2,0 МПа) для биокompозитов на основе полимолочной кислоты и еловой муки в количестве 40 % масс. с различной обработкой поверхности [15].

Г.А. Сабирова и др. разработали биоразлагаемый композит на основе полилактида и древесного наполнителя, подверженного термической модификации. В работе установлено, что степень предварительной термической обработки древесного наполнителя можно регулировать скорость биодеструкции в материале, что может быть использовано в производстве биоразлагаемых упаковок. В зависимости от требуемого жизненного цикла изделия, могут создаваться упаковки с регулируемым сроком разложения. Было выявлено, что с увеличением степени термической обработки наполнителя в композиционном материале с более чем 40 % полимолочной кислоты снижается прочность на разрыв, в то время как при меньшем содержании связующего термическая модификация оказывает положительное действие на прочность [16].

В работе [17] авторы попытались произвести микропористую вспененную полимолочную кислоту (модифицированную разветвляющим агентом Joncyl), армированную 40 % древесной муки из клена с применением экструзии со сверхкритическим диоксидом углерода. В процессе производства было определено, что степень расширения ПМК во вспененных образцах снижается при увеличении содержания древесины. Также в процессе вспенивания и с увеличением содержания древесной муки с 0 до 40 % доля пустот в полимолочной кислоте снизилась с 91 до 47 %. Композиты из микропористой вспененной полимолочной кислоты и кленовой муки с однородной морфологией были успешно получены путем сопоставления вязкости расплава композитов с вязкостью расплава чистой ПМК за счет использования модификатора реологии [18].

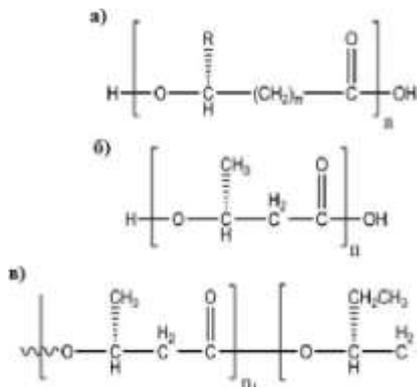
Эта разработка может помочь при создании нового поколения композитов для более широкого применения при низких затратах на производство. Для реализации этого проекта требуются дальнейшие исследования фундаментальной взаимосвязи между структурой пенопласта и механическими характеристиками, а также улучшение совместимости полимолочной кислоты и древесины.

В своей работе Н.Р. Галяветдинов и его коллеги рассмотрели возможность применения композита на основе полимолочной кислоты с наполнителем из измельченных отходов биомассы в качестве упаковочного материала и установили, что при добавлении древесного наполнителя в количестве 50 % от массы композита обеспечивается высокая прочность упаковки и ее хорошая скорость биодegradации после использования [19; 20]. Также были исследованы физико-механические свойства ДПК на основе ПМК и термомодифицированного древесного наполнителя, образцы подвергали испытаниям с погружением в воду на заданные промежутки времени, были исследованы прочностные характеристики при изгибе и изменение их линейных размеров [21; 22].

В изобретении [23] Р.Р. Сафин и др. разработали технологию получения ДПК для изготовления упаковки, полимолочную кислоту смешали с древесно-измельченным наполнителем. Наполнителем выступала древесная мука с частицами размером 0,1–0,25 мм, которую обрабатывали при температуре 200–240 °С в среде инертного газа, а затем облучили ультрафиолетом в течение 30 мин с интенсивностью обработки 30–180 Дж/см. Затем древесный наполнитель и ПМК смешали при температуре 180 °С в соотношении 50х50. В результате разработана доступная технология получения биоразлагаемого композита, при которой повышаются его прочностные показатели.

**Свойства древесно-полимерных композитов на основе полигидроксиалканоев.** Полигидроксиалканоев (ПГА) — это полиэфиры (рис. 2, а), которые синтезируются внутриклеточно бактериями в присутствии избыточного источника углерода, в условиях ограниченности таких элементов для роста, как кислород, азот или фосфор [24].

Наиболее распространенными гомополимерами ПГА являются поли(3-гидроксибутират) (P(ЗНВ)) (рис. 2, б) и поли(3-гидроксибутират-ко-3-гидроксиивалерат) (P(ЗНВ-со-ЗНВ)) (рис. 2, в).



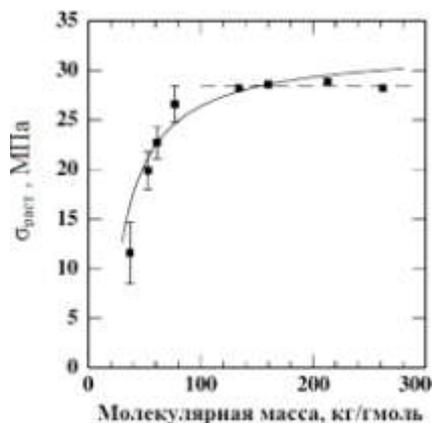
**Рис. 2.** Химическая структура: а — полигидроксиалканоев (ПГА); б — поли(3-гидроксибутират) (P(ЗНВ)); в — поли(3-гидроксибутират-со-3-гидроксиивалерат) (P(ЗНВ-со-ЗНВ))

В настоящее время ПГА производят микробной ферментацией сахара или глюкозы. В сравнении с полипропиленом и полиэтиленом, стоимость полигидроксиалканоев считается высокой, это обусловлено затратами на оборудование для стерилизации, а также необходимостью проведения экстракции.

ПГА обладают рядом свойств, которые делают их перспективными для применения в качестве полимерной матрицы для ДПК, среди них: высокие показатели текучести расплава, прочный контакт с древесными волокнами, разложение в естественной микрофлоре гидролитическим расщеплением с образованием водорастворимых мономеров и олигомеров, метаболизация до углекислого газа и воды в аэробных условиях и до метана в анаэробных условиях [25]. Скорость разложения ПГА зависит от следующих факторов: кристалличности, качества поверхности и типа добавки в биополимер. В отличие от полиолефинов, некоторые ПГА обладают низкой термической стабильностью в расплаве. Исследования показали, что молекулярная масса полигидроксиалканоев может уменьшаться в процессе обработки из-за случайных разрывов цепи, но если провести соответствующую предварительную обработку (промывку кислотой и использование антиоксиданта), этот эффект можно значительно снизить [26].

Предел прочности гомополимера ПГА P(ЗНВ-со-ЗНВ) остается постоянным при потере молекулярной массы до тех пор, пока она не станет ниже 100 кг/гмоль, после чего она резко уменьшается по мере уменьшения степени перепутывания цепей [37]. График зависимости предельной прочности на разрыв от молекулярной массы P(ЗНВ-со-ЗНВ) представлен на рис. 3.

Другие проблемы обработки некоторых ПГА включают медленную скорость кристаллизации и изменения механических свойств при старении из-за вторичной кристаллизации при комнатной температуре, которая делает материалы более хрупкими, но которую также можно модифицировать и контролировать путем ограничения размера сферолитов [27].



**Рис. 3.** График зависимости предельной прочности при растяжении от молекулярной массы P(ЗНВ-со-ЗНВ)

Гомополимер поли(3-гидроксибутират) (P(ЗНВ)) является хрупким материалом и обрабатывается в узком диапазоне температур. Для решения этих проблем, исследователи изучили свойства других гомополимеров или статистических сополимеров ПГА. Например, увеличение показателя текучести расплава на 150 % было достигнуто при увеличении содержания ЗНВ от 0 до 15 мол. %. P(ЗНВ-со-ЗНВ) имеет высокую ударную вязкость за счет более низкого модуля упругости при изгибе при увеличении содержания ЗНВ от 0 до 28 %. P(ЗНВ-со-ЗНВ) становится мягким, гибким и жестким в диапазоне состава ЗНВ 30–60 мол. %. Температура плавления P(ЗНВ-со-ЗНВ) уменьшалась с увеличением содержания ЗНВ: например, сообразилось, что средняя температура плавления снизилась с 180 до 132 °С, когда содержание ЗНВ увеличилось от 0 до 25 мол. % [28].

Помимо P(ЗНВ-со-ЗНВ), несколько других коммерчески доступных сополимеров ПГА, включая P(ЗНВ-со-ЗННВ) и P(ЗНВ-со-4НВ) также потенциальны для использования. Синтезированный P(ЗНВ-со-ЗННВ) продемонстрировал значительно более высокое удлинение при разрыве (400 %), но более низкую прочность на разрыв (7 МПа) и модуль упругости (0,39 ГПа) по сравнению с гомополимером P(ЗНВ).

Для того, чтобы снизить стоимость производства полигидроксиалканоев в исследованиях рассматривается вопрос о применении органических отходов в качестве сырья [29]. Также необходимо использование бактериальной продукции смешанной культуры, устойчивой к использованию различных отходов углерода. При использовании смешанных культур можно исключить затраты на стерилизацию и покупку очищенных субстратов. ПГА можно было бы производить из богатых углеродом отходов целлюлозы и бумаги с производства древесного волокна и муки. Было показано, что ПГА, экстрагированный из бактериальной биомассы, полученной из потоков сточных вод, обладает свойствами, сравнимыми с коммерческими ПГА. Благодаря высокой продуктивности ПГА (содержание клеток до 89 мас. % в течение 7,6 ч), достигнутой в обогащенных смешанных культурах, производство ПГА в смешанных культурах становится все более ожидаемым как коммерчески жизнеспособная технология. Таким образом, полигидроксиалканоев можно адаптировать путем изменения соотношения сополимеров, чтобы продемонстрировать широкую комбинацию свойств для применения в различных целях [30].

При добавлении древесного наполнителя в P(ЗНВ) и P(ЗНВ-со-ЗНВ) повышается жесткость, но у этих композитов меньше предел прочности и удлинение при разрыве. Полигидроксиалканоев имеют медленную скорость кристаллизации, добавление древесного наполнителя обеспечивает появление центров зародышеобразования, при этом увеличивая скорость кристаллизации полимера из расплава [31]. Компо-

зиты на основе P(ЗНВ-со-ЗНУ) с высоким содержанием ЗНУ (8–10 %) демонстрируют высокие показатели удлинения при разрыве, но низкие предел прочности и модуль упругости. В композитах с P(ЗНВ-со-ЗНУ) при содержании ЗНУ < 8 % добавление древесного наполнителя приводит к повышению значения модуля упругости.

А.Х. Сафиуллина и др. в своей работе предложили применение полигидроксиалканоев в качестве замены синтетических полимеров, Н.Р. Галяветдинов и его коллеги разработали контейнеры для сельскохозяйственных нужд из биоразлагаемого композита на основе полигидроксibuтирата и лигнина. В результате было определено оптимальное содержание древесного наполнителя в композите, оно составило 40–50 %, в данном интервале композитный материал имеет высокие физико-механические характеристики [32; 33].

Композиты P(ЗНУ) с целлюлозой имеют высокие свойства на растяжение, низкую ударную вязкость в сравнении с композитами из полипропилена [31]. В процессе производства прессованных листов композитов P(ЗНВ-со-ЗНУ) (с долей ЗНУ 8 %), содержащих 18 % мас. высокотемпературного волокна механической целлюлозы на основе сосны лучистой, было выявлено, что на механические свойства и характеристики композитов большое влияние оказывает температура обработки [34].

В работе [8] установлено, что молекулярная масса P(ЗНУ) в композитах полиэтиленгликоль/P(ЗНУ) с 10 % мас. буковой муки, снижается вдвое после обработки при температуре 170 °С в течение 7 мин и при 180 °С в течение 4 мин, добавление пластификаторов снижало потерю молекулярной массы.

Сингх и др. оценили механические характеристики экструдированных ДПК, содержащих P(ЗНВ-со-ЗНУ) с 8 % ЗНУ и древесным волокном клена (0–40 % масс.). Модуль упругости увеличился с 1,02 до 2,73 ГПа после увеличения содержания древесного волокна. При этом предел прочности снизился с 21,4 до 16,8 МПа. Снижение связано с плохой межфазной адгезией [35]. Введение древесной муки улучшило термическую стабильность композита, но вместе с этим ухудшилась стабильность размеров, о чем свидетельствует уменьшение коэффициента линейного теплового расширения; стабильность размеров ухудшилась, о чем свидетельствует уменьшение коэффициента линейного теплового расширения с 182 до  $154 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ . Исследование продолжили и перешли к изучению свойств новых гибридных композитов с дополнительным армированием микроразмерным тальком. В ходе эксперимента модуль упругости увеличился на 200 % [36].

Добавление 20 и 40 мас. % древесной муки увеличивает жесткость P(ЗНВ-со-ЗНУ) на 114 и 127 %, модуль упругости до 3,8 и 4,3 ГПа. Предел прочности снижается с 34,8 до 21,4 МПа при загрузке древесины 40 мас. %, а удлинение при разрыве уменьшилось вдвое, до 0,8 %. Аналогичные тенденции наблюдались при испытаниях на трехточечный изгиб. Под воздействием влаги снижались жесткость при изгибе и прочность композитов, сильное влияние оказывалось на композит с более высоким содержанием древесины. На основе этих данных авторами была построена модель, по которой было выявлено, что макромасштабные трещины вызывают гидротермальное разрушение ДПК [37].

Благодаря своим механическим свойствам и биоразлагаемости полигидроксиалканоев перспективны для применения в качестве полимерной матрицы в ДПК. Считается, что фундаментальные знания о взаимосвязях структуры и свойств ДПК на основе ПГА помогут разработать оптимальные рецептуры и методы обработки для целевого применения биокомпозитов.

**Свойства древесно-полимерных композитов на основе термопластичного крахмала.** Крахмал — это полукристаллический полимер, который состоит из линейной амилозы и разветвленного амилопектина, его можно получить из куку-

рузы, картофеля и маниоки [38]. Крахмал — наиболее распространенный возобновляемый материал, он съедобен и биоразлагаем. Переработка крахмала является сложным процессом, однако его можно модифицировать виниловыми мономерами, смешать с другими полимерами или обработать пластификаторами.

Свои термопластичные свойства крахмал проявляет в присутствии воды и глицерина, при высоких температурах (90–180 °С) и при сдвиге. Термопластичный крахмал можно экструдировать и подвергать литью под давлением благодаря тому, что в таком состоянии он легко плавится и течет. Основными недостатками крахмала являются его чувствительность к влаге и плохая механическая стабильность. Предел прочности ТПК находится в пределах 0,2–5,8 МПа, что значительно ниже, чем у ПГА и ПМК [39].

В процессе хранения термопластичный крахмал теряет механическую прочность и жесткость из-за старения в результате гидролиза, который, в свою очередь, вызван сорбцией и диффузией воды в матрицу, а также из-за перекристаллизации амилопектина, называемой ретроградацией. Все последние исследования были сосредоточены на улучшении механических свойств, снижении водопоглощения и подавлении ретроградации ТПК, где в процесс вступает включение наночастиц и других наполнителей. Некоторые исследователи пытались модифицировать структуру крахмала путем ацетилирования, и степень ацетилирования сильно влияла на физические свойства полученных материалов [40].

В некоторых случаях ТПК смешивали с другими биополимерами для сохранения биоразлагаемости конечной смеси. Широкое распространение получили биополимерные компоненты, такие как алифатические полиэфиры (поликапролактон (ПКЛ) или полигидроксibuтиратковалерат (ПГБВ)). В других случаях смесь с синтетическими полимерами, такими как полиэтилен, приводили к получению не полностью биоразлагаемых материалов [41].

Крахмал не нашел широкого применения в производстве композитов по сравнению с полигидроксиалканоев и полимолочной кислотой из-за его плохих механических и водонепроницаемых свойств. Несмотря на то, что матрица обладает плохими механическими свойствами, при добавлении древесного наполнителя улучшение механической прочности и снижение удлинения при разрыве гораздо более заметны, чем при добавлении наполнителя в биоразлагаемые полиэфиры. Такое явление связано с химическим сходством между ТПК и древесиной, следовательно, совместимость между ними лучше.

Мюллер и др. использовали модель механической прочности для количественной оценки межфазной адгезии между кукурузным крахмалом и древесными волокнами и обнаружили, что такая граница раздела демонстрирует более сильную адгезию, чем с полипропиленом и полимолочной кислотой [42]. Кроме того, при анализе на инфракрасном спектрографе с преобразованием Фурье выявлена совместимость между крахмалом маниоки и частицами древесины, что было связано с ассоциацией водородных связей ОН-групп [43]. В отличие от полимолочной кислоты и полигидроксиалканоев, исследования ДПК на основе термопластичного крахмала сосредоточены на понимании армирующих эффектов различных древесных наполнителей, а не на улучшении межфазной адгезии за счет добавления компатибилизаторов.

Добавление 16 % мас. отбеленной целлюлозы к кукурузному крахмалу, пластифицированному 30 % глицерина, привело к 100%-му увеличению предела прочности и 150%-му увеличению модуля упругости. Предел прочности композитов с пластифицированным кукурузным крахмалом повышается с увеличением содержания древесины, но при превышении содержания древесины 40 % мас. начинает снижаться [44].

Другие типы крахмалов, картофельный и крахмал маниоки, также использовались в композитах. Добавление древесных наполнителей к пластифицированному 30 % глицерина картофельному крахмалу и крахмалу маниоки привело к такому же улучшению предела прочности и модуля упругости, как и у ДПК на основе кукурузного крахмала [45].

В исследовании Т. Żelaziński и др. была выявлена следующая закономерность: прочность материала увеличивалась с увеличением доли сосновой древесной муки, однако наибольшее значение (6,77 МПа) при содержании 25 % муки после добавления 35 % древесной муки прочность изделия снижалась до 5,19 МПа, дальнейшее увеличение содержания муки также приводило к снижению прочностных характеристик. Был проведен анализ модуля упругости, который также достигал своих максимальных значений (6,42 МПа) при содержании в материале 25 % древесной сосновой муки; с увеличением содержания муки модуль Юнга снижался.

В ходе проведенных испытаний было замечено, что существует максимальный предел добавления муки, начиная с которого, заметно снижение прочности. Снижение прочности полученных композитов с содержанием муки 30 и 35 % может быть связано с меньшей способностью поглощать воду частицами древесной муки.

Полученные результаты являются многообещающими и подтверждают правомерность использования сосновой древесной муки для упрочнения композитов, изготовленных из ТПК. Использование большей доли муки, более 35 % от массы крахмала, требует применения дополнительных компонентов, упрочняющих матрицу. Композиты из ТПК и древесной муки являются гидрофильными материалами, поэтому для повышения их устойчивости к влаге требуется использование дополнительных компонентов, барьерных слоев, снижающих водопоглощение [46].

Порода древесины также может влиять на свойства композитов: ель и сосна обеспечивают лучшие механические свойства и термическую стабильность, чем бук и тополь. При уменьшении размера частиц с 750 до 150 мкм увеличился предел прочности, уменьшилось водопоглощение композитов [47]. Добавление древесного наполнителя однозначно улучшает свойства древесно-полимерных композитов на основе ТПК, но чувствительность этих композитов к влаге ограничивает возможности применения материала.

**Свойства древесно-полимерных композитов на основе других биоразлагаемых полимеров.** В древесно-полимерные композиты также можно включать другие виды биоразлагаемых полимеров, такие как поликапролактон (ПКЛ), поливиниловый спирт (ПВА), сложные эфиры целлюлозы, например, ацетат целлюлозы.

Поликапролактон — это полимер на основе нефти, который полностью биоразлагаем в аэробной почве и компосте. Сообщалось, что скорость биоразложения ПКЛ была выше, чем у P(3НВ-со-3НВ) [48]. ПКЛ обычно получают полимеризацией с раскрытием цикла капролактона. Он широко используется в биомедицинской промышленности в качестве биоматериала для имплантации и доставки лекарств. ПКЛ имеет аналогичные механические свойства с полимолочной кислотой, но имеет низкую температуру стеклования — 60 °С при температуре плавления 60 °С, это ограничивает его более широкое применение. Обладая относительно более высоким удлинением при разрыве и ударной вязкостью, поликапролактон и его ДПК обладают уникальными преимуществами для применения в тех случаях, когда требуются гибкость и прочность материала [49].

Н. Нитц и др. в своем исследовании изучили свойства древесно-полимерных композитов, полученных с поликапролактоном и наполнителями древесной мукой (10–50 %) и лигнином (10–70 %). В качестве компатибилизатора использовался сополимер поликапролактама и малеинового ангид-

рида. Было установлено, что прочность на растяжение и модуль Юнга возрастают с увеличением доли древесной муки и, в меньшей степени, лигнина [50]. Композиты на основе древесной муки подвергаются биоразложению в почве через 4 недели, а лигнинсодержащие композиты в этот период устойчивы к биоразложению. Также установлено, что присутствие наполнителя в композите может ускорить биоразложение матрицы поликапролактона; с повышением содержания наполнителя этот эффект ускоряется. В присутствии наполнителя происходит подавление кристаллизации поликапролактона и усиление гидролитического воздействия на полимеры.

В работе Л.В. Ляминой и др. [51] как перспективный материал для применения в древесно-полимерном композите рассмотрен поливиниловый спирт. Для оптимизации процесса производства, улучшения качества продукта, снижения затрат был исследован процесс вакуумно-кондуктивной сушки древесностружечного материала на основе ПВА. В работе установлено, что ДПК с содержанием поливинилового спирта в количестве 40 % полностью соответствуют установленным стандартам по следующим характеристикам: пределу прочности при изгибе и растяжении.

Эфиры целлюлозы, такие как ацетат целлюлозы, представляют собой химически модифицированные формы целлюлозы, получаемые этерификацией целлюлозы с использованием кислот или ангидридов. Целлюлоза — это богатый природный полимер, который можно извлечь из растительных клеток. Недавние отчеты также продемонстрировали производство целлюлозы посредством бактериальной ферментации. В целом чистый ацетат целлюлозы имеет механические свойства, аналогичные обычным биоразлагаемым полиэфирам, но имеет более высокую температуру плавления, 230 °С, и более низкий индекс текучести расплава (2,1 при 230 °С при загрузке 2,16 кг), чем биоразлагаемые полиэфиры. Ацетат целлюлозы часто пластифицируют или смешивают с другими термопластами для композитных материалов. Доказано, что добавление пластификатора улучшает текучесть расплава и удлинение при разрыве, при этом снижается прочность на разрыв. Ацетат целлюлозы медленно разлагается в почве и компосте, добавление пластификаторов на основе триацетина значительно увеличивает скорость разложения [52].

Композиты на основе поликапролактона имеют плохие механические свойства и значительно более низкую температуру плавления (58 °С) по сравнению с полимолочной кислотой и полигидроксикарбонатами. Нитц и др. успешно применили реактивную экструзию для прививки малеинового ангидрида к цепям поликапролактона, таким образом, добавление 5 % мас. привитого поликапролактона улучшило предел текучести и ударную вязкость композитов, но оказало минимальное влияние на модуль упругости [50].

**Заключение.** На основе изученных исследований представлена информация об основных видах биоразлагаемых полимеров, их свойствах и характеристиках, перспективах применения в древесно-полимерных композитах. Исследования в области биоразлагаемых ДПК на основе полимеров актуальны на фоне опасений по поводу накопления пластиковых отходов в окружающей среде и нестабильности цен на нефть. Различные типы биоразлагаемых термопластов, включая как биоразлагаемые (например, эфиры крахмала и целлюлозы), так и полученные из нефти (полимолочная кислота посредством химического синтеза и поликапролактон), коммерчески доступны и хорошо изучены. Они обладают многими общими свойствами, сравнимыми с традиционными полиолефинами, и преимуществами компостируемости и биоразлагаемости.

При исследовании свойств ДПК на основе различных биополимеров было выявлено улучшение жесткости композита и снижение удлинения при разрыве с увеличением содержания древесины. Также известно, что прочность композита определяется силой межфазного сцепления между полимером и древесным наполнителем.

Наполнители на основе древесины быстро появляются в композитных материалах из-за их низкой стоимости, легкого веса, большого количества и биоразлагаемости. Полученные композиты обладают преимуществами по сравнению с дру-

гими композитами, такими как стекловолокно и терморезактивные композиты, с точки зрения их полной биоразлагаемости и формоустойчивости, что позволяет решить проблему загрязнения окружающей среды и увеличить возможности применения древесно-композиционных материалов.

*Исследование проведено с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Наноматериалы и нанотехнологии» Казанского национального исследовательского технологического университета при финансовой поддержке проекта Минобрнауки России в рамках гранта № 075-15-2021-699.*

#### Литература

- Pandey J.K., Ahn S.H., Lee C.S., Mohanty A.K., Misra M. Recent Advances in the Application of Natural Fiber Based Composites. *Macromol. Mater. Eng.* 2010. 295. P. 975-989. URL: <https://doi.org/10.1002/mame.201000095> (дата обращения: 30.10.2023).
- Faruk O., Bledzki A.K., Fink H.P., Sain M. Biocomposites Reinforced with Natural Fibers: 2000-2010. *Prog. Polym. Sci.* 2012. 37. P. 1552-1596. URL: <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2012.04.003> (дата обращения: 30.10.2023).
- Reddy M.M., Vivekanandhan S., Misra M., Bhatia S.K., Mohanty A.K. Biobased Plastics and Bionanocomposites: Current Status and Future Opportunities. *Prog. Polym. Sci.* 2013. 38. P. 1653-1689. URL: <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2013.05.006> (дата обращения: 30.10.2023).
- Lopes M.S., Jardim A.L., Filho R.M. Poly (Lactic Acid) Production for Tissue Engineering Applications. *Procedia Eng.* 2012. 42. P. 1402-1413. URL: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.534> (дата обращения: 20.10.2023).
- Leenslag J.W., Pennings A.J. Synthesis of High-Molecular-Weight Poly(L-Lactide) Initiated with Tin 2-Ethylhexanoate. *Die Makromolekulare Chemie.* 1987. 188. P. 1809-1814. URL: <https://doi.org/10.1002/macp.1987.021880804> (дата обращения: 20.10.2023).
- Mehta R., Kumar V., Bhunia H., Upadhyay S.N. Synthesis of Poly (Lactic Acid): A Review. *J. Macromol. Sci., Polym. Rev.* 2005. 45. P. 325-349. URL: <https://doi.org/10.1080/15321790500304148> (дата обращения: 30.10.2023).
- Bigg D.M. Polylactide Copolymers: Effect of Copolymer Ratio and end Capping on their Properties. *Adv. Polym. Technol.* 2005. 24. P. 69-82. URL: <https://doi.org/10.1002/adv.20032> (дата обращения: 22.10.2023).
- Jamshidian M., Tehrani E.A., Imran M., Jacquot M., Desobry S. Poly-Lactic Acid: Production, Applications, Nanocomposites, and Release Studies. *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.* 2010. 9. P. 552-571. URL: <https://doi.org/10.1111/j.1541-4337.2010.00126.x> (дата обращения: 22.10.2023).
- Ohkita T., Lee S.H. Thermal Degradation and Biodegradability of Poly (Lactic Acid) / Corn Starch Biocomposites. *J. Appl. Polym. Sci.* 2006. 100. P. 3009-3017. URL: <https://doi.org/10.1002/app.23425> (дата обращения: 10.10.2023).
- Urayama H., Kanamori T., Kimura Y. Properties and Biodegradability of Polymer Blends of Poly (Lactide) s with Different Optical Purity of the Lactate Units. *Macromol. Mater. Eng.* 2002. 287. P. 116-121. URL: [https://doi.org/10.1002/14392054\(20020201\)287:2%3c116:AID-MAME116%3e3.0.CO;2-](https://doi.org/10.1002/14392054(20020201)287:2%3c116:AID-MAME116%3e3.0.CO;2-) (дата обращения: 20.10.2023).
- Галаявдинов Н.Р., Сабирова Г.А., Хайруллин Р.З. Исследование скорости деградации древесно-наполненных PLA композитов в кислых и щелочных растворах // *Деревообрабатывающая пром-сть.* 2019. № 4. С. 62-68.
- Каблов В.Ф. Проблемы современной технологии полимеров: моногр. Волгоград, 2019. 325 с.
- Febrianto F., Yoshioka M., Nagai Y., Tahir P.M.D., Syafii W., Shirai-shi N. The morphological, Mechanical and Physical Properties of Wood Flour-Poly Lactic Acid Composites Under Various Filler Types. *J. Biol. Sci.* 2006. 6. P. 555-563. URL: <https://doi.org/10.3923/jbs.2006.555.563> (дата обращения: 20.10.2023).
- Peltola H., Pääkkönen E., Jetsu P., Heinemann S. Wood based PLA and PP Composites: Effect of Fibre Type and Matrix Polymer on Fibre Morphology, Dispersion and Composite Properties. *Compos. Part A.* 2014. 61. P. 13-22. URL: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2014.02.002> (дата обращения: 20.10.2023).
- Gregorova A., Wimmer R., Hrabalova M., Koller M., Ters T., Mündigler N. Effect of surface modification of beech wood flour on mechanical and thermal properties of poly (3-hydroxybutyrate) / wood flour composites. *Holzforschung* 2009. 63. P. 565-570.
- Галаявдинов Н.Р., Сабирова Г.А., Сафин Р.Р., Галиханов М.Ф. Исследование биоразлагаемых древесно-наполненных композиционных материалов на основе полилактида // *Деревообрабатывающая пром-сть.* 2019. № 3. С. 61-68.
- Matuana L.M., Diaz C.A. Strategy To Produce Microcellular Foamed Poly (Lactic Acid) / Wood-Flour Composites in a Continuous Extrusion Process. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2013. 52. P. 12032-12040. URL: <https://doi.org/10.1021/ie4019462> (дата обращения: 20.10.2023).
- Batista K.C., Silva D.A.K., Coelho L.A.F., Pezzin S.H., Pezzin A.P.T. Soil Biodegradation of PHBV / Peach Palm Particles Biocomposites. *J. Polym. Environ.* 2010. 18. P. 346-354. URL: <https://doi.org/10.1007/s10924-010-0238-4> (дата обращения: 30.10.2023).
- Галаявдинов Н.Р., Сафин Р.Р., Талипова Г.А., Петров В.И. Исследование физико-механических свойств древесно-наполненных композитов на основе полилактида с целью создания биоразлагаемых упаковок // *Деревообрабатывающая пром-сть.* 2018. № 4. С. 12-18.
- Галаявдинов Н.Р., Илалова Г.Ф., Мухтарова А.Р. Полилактид как перспективный биоразлагаемый полимер для древесно-полимерных композитов // *Деревообрабатывающая пром-сть.* 2017. № 3. С. 51-53.
- Galyavetdinov N.R., Talipova G.A., Safin R.R. Study of the destructive properties of biodegradable wood-filled composite material *Materials Science Forum.* 2020. V. 992. P. 290-295.
- Галаявдинов Н.Р., Ахунова Л.В. Анализ физико-механических свойств композитов на основе полилактида и термомодифицированных древесных волокон // *Деревообрабатывающая пром-сть.* 2016. № 1. С. 55-59.
- Сафин Р.Р., Галаявдинов Н.Р., Сабирова Г.А., Кайнов П.А., Кайнов П.А., Мухаметзянов Ш.П., Илалова Г.Ф., Сафиуллина А.Х., Сафина А.В., Хасаншина Р.Т. Способ получения биоразлагаемой полимерной композиции: пат. на изобретение № 2750712 С1; опубл. 01.07.2021; заявл. № 2020138804 от 24.11.2020.
- Huang J.C., Shetty A.S., Wang M.S. Biodegradable plastic: A review. *Adv. Polym. Technol.* 1990. 10. P. 23-30. URL: <https://doi.org/10.1002/adv.1990.060100103> (дата обращения: 20.10.2023).
- Shah A.A., Hasan F., Hameed A., Ahmed S. Biological Degradation of Plastics: A Comprehensive Review. *Biotechnol. Adv.* 2008. 26. P. 246-265. URL: <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2007.12.005> (дата обращения: 30.10.2023).
- Arcos-Hernandez M.V., Laycock B., Pratt S., Donose B.C., Nikolic M.A.L., Luckman P., Werker A., Lant P.A. Biodegradation in a Soil Environment of Activated Sludge Derived Polyhydroxyalkanoate (PHBV). *Polym. Degrad. Stab.* 2012. 97. P. 2301-2312. URL: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2012.07.035> (дата обращения: 30.10.2023).
- Reinsch V.E., Kelley S.S. Crystallization of Poly(Hydroxybutyrate-Co-Hydroxyvalerate) in Wood Fiber-Reinforced Composites. *J. Appl. Polym. Sci.* 1997. 64. P. 1785-1796. URL: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-4628\(19970531\)64:9%3c1785::AID-APP15%3e3.0.CO;2-X](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-4628(19970531)64:9%3c1785::AID-APP15%3e3.0.CO;2-X) (дата обращения: 20.10.2023).

28. Holmes P.A. Biologically Produced (R)-3-Hydroxyalkanoate Polymers and Copolymers. In *Developments in Crystalline Polymers*; Bassett, D. C. Ed.; Springer Netherlands: Dordrecht, 1988. P. 1-65.
29. Nikodinovic-Runic J., Guzik M., Kenny S.T., Babu R., Werker A., KE O.C. Carbon-Rich Wastes as Feedstocks for Biodegradable Polymer (Polyhydroxyalkanoate) Production Using POLYMER REVIEWS 43 Downloaded by [Central Land Council Library] at 14:42 02 November 2017 Bacteria. *Adv. Appl. Microbiol.* 2013. 84. P. 139-200. URL: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-407673-0.00004-7> (дата обращения: 22.10.2023).
30. Arcos-Hernandez M.V., Laycock B., Donose B.C., Pratt S., Halley P., Al-Luaibi S., Werker A., Lant P.A. Physicochemical and Mechanical Properties of Mixed Culture Polyhydroxyalkanoate (PHBV). *Eur. Polym. J.* 2013. 49. P. 904-913. URL: <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2012.10.025> (дата обращения: 20.10.2023).
31. Reinsch V.E., Kelley S.S. Crystallization of Poly (Hydroxybutyrate-Co-Hydroxyvalerate) in Wood Fiber-Reinforced Composites. *J. Appl. Polym. Sci.* 1997. 64. P. 1785-1796. URL: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-4628\(19970531\)64:9%3c1785::AID-APP15%3e3.0.CO;2-X](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-4628(19970531)64:9%3c1785::AID-APP15%3e3.0.CO;2-X) (дата обращения: 30.10.2023).
32. Гаяветдинов 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.
33. Сафиуллина А.Х., Илалова Г.Ф., Халитов Р.А., Петров В.И. Актуальные проблемы и перспективы применения полигидроксиалканоатов // *Деревообрабатывающая пром-сть.* 2020. № 4. С. 62-69.
34. Peterson S., Jayaraman K., Bhattacharyya D. Forming Performance and Biodegradability of Woodfibre-BiopoleTM Composites, *Composites Part A.* 2002. 33. P. 1123-1134. URL: [https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(02\)00046-5](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(02)00046-5) (дата обращения: 28.10.2023).
35. Singh S., Mohanty A.K. Wood Fiber Reinforced Bacterial Bioplastic Composites: Fabrication and Performance Evaluation. *Compos. Sci. Technol.* 2007. 67. P. 1753-1763. URL: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2006.11.009> (дата обращения: 28.10.2023).
36. Singh S., Mohanty A.K., Misra M. Hybrid Bio-Composite from Talc, Wood Fiber and Bioplastic: Fabrication and Characterization. *Compos. Part A.* 2010. 41. P. 304-312. URL: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2009.10.022> (дата обращения: 28.10.2023).
37. Srubar W.V., Billington S.L. A Micromechanical Model for Moisture-Induced Deterioration in Fully Biorenewable Wood-Plastic Composites. *Compos. Part A.* 2013. 50. P. 81-92. URL: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2013.02.001> (дата обращения: 28.10.2023).
38. Bogracheva T.Y., Wang Y.L., Wang T.L., Hedley C.L. Structural studies of starches with different water contents. *Biopolymers.* 2002. 64 (5). P. 268-281.
39. Zhang Y., Rempel C., Liu Q. Thermoplastic Starch Processing and Characteristics-a Review. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 2014. 54. P. 1353-1370. URL: <https://doi.org/10.1080/10408398.2011.636156> (дата обращения: 24.10.2023).
40. Chi H., Xu K., Wua X., Chen Q., Xue D., Song C., Zhang W., Wang P. Effect of acetylation on the properties of corn starch. *Food Chem.* 2008. 106. P. 923-928.
41. Averous L., Fauconnier N., Moro L., Fringant C. Blends of thermoplastic starch and polyestamide: Processing and properties. *J. Appl. Polym. Sci.* 2000. 76 (7). P. 1117-1128.
42. Muller P., Renner K., Moczo J., Fekete E., Pukanszky B. Thermoplastic Starch / Wood Composites: Interfacial Interactions and Functional Properties. *Carbohydr. Polym.* 2014. 102. P. 821-829. URL: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.10.083> (дата обращения: 30.10.2023).
43. Lomeli-Ramirez M.G., Barrios-Guzman A.J., Garcia-Enriquez S., Rivera-Prado J.d.J., Manriquez-Gonzalez R. Chemical and Mechanical Evaluation of Bio-Composites Based on Thermoplastic Starch and Wood Particles Prepared by Thermal Compression. *Bioresources.* 2014. 9. P. 2960-2974. URL: <https://doi.org/10.15376/biores.9.2.2960-2974> (дата обращения: 20.10.2023).
44. Curvelo A.A.S., de Carvalho A.J.F., Agnello J.A.M. Thermoplastic Starch-Cellulosic Fibers Composites: Preliminary Results. *Carbohydr. Polym.* 2001. 45. P. 183-188. URL: [https://doi.org/10.1016/S0144-8617\(00\)00314-3](https://doi.org/10.1016/S0144-8617(00)00314-3) (дата обращения: 20.10.2023).
45. Cobut A., Sehaqui H., Berglund L.A. Cellulose Nanocomposites by Melt Compounding of TEMPO-Treated Wood Fibers in Thermoplastic Starch Matrix. *Bioresources.* 2014. 9. P. 3276-3289. URL: <https://doi.org/10.15376/biores.9.2.3276-3289> (дата обращения: 28.10.2023).
46. Żelaziński T., Ekielski A., Tulska E., Vladut V., Durczak K. Wood dust application for improvement of selected properties of thermoplastic starch. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Wood-dust-application-for-improvement-of-selected-%C5%BBelazi%C5%84ski-Ekielski/95edffacdbc920d12d3ed9c0b074149c308ac29e> (дата обращения: 28.10.2023).
47. Teramoto N., Urata K., Ozawa K., Shibata M. Biodegradation of Aliphatic Polyester Composites Reinforced by Abaca Fiber. *Polym. Degradation Stab.* 2004. 86. P. 401-409. URL: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2004.04.026> (дата обращения: 28.10.2023).
48. Guo W., Tao J., Yang C., Song C., Geng W., Li Q., Wang Y., Kong M., Wang S. Introduction of Environmentally Degradable Parameters to Evaluate the Biodegradability of Biodegradable Polymers. *PLoS One.* 2012. 7. e38341. URL: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0038341> (дата обращения: 30.10.2023).
49. Новаков И.А., Каблов В.Ф., Петрюк И.П. Микро- и наноструктура и свойства эластомерных материалов. *Волгоград: ВолГГТУ,* 2012. 112 с.
50. Safin R.R., Lyamina L.V., Safina A.V., Mukhametzyanov S.R. Investigation of the rate of vacuum-conductive drying of wood-particle panels based on polyvinyl alcohol *Key Engineering Materials.* 2021. V. 887 KEM. P. 466-472.
51. Guruprasad K.H., Shashidhara G.M. Grafting, Blending, and Biodegradability of Cellulose Acetate. *J. Appl. Polym. Sci.* 2004. 91. P. 1716-1723. URL: <https://doi.org/10.1002/app.13386> (дата обращения: 28.10.2023).

#### Reference

- Pandey J.K., Ahn S.H., Lee C.S., Mohanty A.K., Misra M. Recent Advances in the Application of Natural Fiber Based Composites. *Macromol. Mater. Eng.* 2010. 295. P. 975-989. URL: <https://doi.org/10.1002/mame.201000095> (дата обрashcheniya: 30.10.2023).
- Faruk O., Bledzki A.K., Fink H.P., Sain M. Biocomposites Reinforced with Natural Fibers: 2000-2010. *Prog. Polym. Sci.* 2012. 37. P. 1552-1596. URL: <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2012.04.003> (дата обрashcheniya: 30.10.2023).
- Reddy M.M., Vivekanandhan S., Misra M., Bhatia S.K., Mohanty A.K. Biobased Plastics and Bionanocomposites: Current Status and Future Opportunities. *Prog. Polym. Sci.* 2013. 38. P. 1653-1689. URL: <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2013.05.006> (дата обрashcheniya: 30.10.2023).
- Lopes M.S., Jardim A.L., Filho R.M. Poly (Lactic Acid) Production for Tissue Engineering Applications. *Procedia Eng.* 2012. 42. P. 1402-1413. URL: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.534> (дата обрashcheniya: 20.10.2023).
- Leenslag J.W., Pennings A.J. Synthesis of High-Molecular-Weight Poly(L-Lactide) Initiated with Tin 2-Ethylhexanoate. *Die Makromolekulare Chemie.* 1987. 188. P. 1809-1814. URL: <https://doi.org/10.1002/macp.1987.021880804> (дата обрashcheniya: 20.10.2023).
- Mehta R., Kumar V., Bhunia H., Upadhyay S.N. Synthesis of Poly (Lactic Acid): A Review. *J. Macromol. Sci., Polym. Rev.* 2005. 45. P. 325-349. URL: <https://doi.org/10.1080/15321790500304148> (дата обрashcheniya: 30.10.2023).
- Bigg D.M. Polylactide Copolymers: Effect of Copolymer Ratio and end Capping on their Properties. *Adv. Polym. Technol.* 2005. 24. P. 69-82. URL: <https://doi.org/10.1002/adv.20032> (дата обрashcheniya: 22.10.2023).
- Jamshidian M., Tehrani E.A., Imran M., Jacquot M., Desobry S. Poly-Lactic Acid: Production, Applications, Nanocomposites, and Release Studies. *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.* 2010. 9. P. 552-571. URL: <https://doi.org/10.1111/j.1541-4337.2010.00126.x> (дата обрashcheniya: 22.10.2023).
- Ohkita T., Lee S.H. Thermal Degradation and Biodegradability of Poly (Lactic Acid) / Corn Starch Biocomposites. *J. Appl. Polym. Sci.*

2006. 100. P. 3009-3017. URL: <https://doi.org/10.1002/app.23425> (data obrashcheniya: 30.10.2023).
10. Urayama H., Kanamori T., Kimura Y. Properties and Biodegradability of Polymer Blends of Poly (Llactide) s with Different Optical Purity of the Lactate Units. *Macromol. Mater. Eng.* 2002. 287. P. 116-121. URL: [https://doi.org/10.1002/14392054\(20020201\)287:2%3c116:AID-MAME116%3e3.0.CO;2-](https://doi.org/10.1002/14392054(20020201)287:2%3c116:AID-MAME116%3e3.0.CO;2-) (data obrashcheniya: 20.10.2023).
  11. Galiavetdinov N.R., Sabirova G.A., KHairullin R.Z. Study of the degradation rate of wood-filled PLA composites in acidic and alkaline solutions // *Derevoobrabatvaishaya promyshlennost'* (Woodworking industry). 2019. № 4. P. 62-68.
  12. Kablov V.F. Problems of modern polymer technology: monografiia. VPI (filial) VolgGTU. Volgograd, 2019. 325 p.
  13. Febrianto F., Yoshioka M., Nagai Y., Tahir P.M.D., Syafii W., Shiraishi N. The morphological, Mechanical and Physical Properties of Wood Flour-Poly Lactic Acid Composites Under Various Filler Types. *J. Biol. Sci.* 2006. 6. P. 555-563. URL: <https://doi.org/10.3923/jbs.2006.555.563> (data obrashcheniya: 20.10.2023).
  14. Peltola H., Pääkkönen E., Jetsu R., Heinemann S. Wood based PLA and PP Composites: Effect of Fibre Type and Matrix Polymer on Fibre Morphology, Dispersion and Composite Properties. *Compos. Part A.* 2014. 61. P. 13-22. URL: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2014.02.002> (data obrashcheniya: 20.10.2023).
  15. Gregorova A., Wimmer R., Hrabalova M., Koller M., Ters T., Mundigler N. Effect of surface modification of beech wood flour on mechanical and thermal properties of poly (3-hydroxybutyrate) / wood flour composites. *Holzforschung* 2009. 63. P. 565-570.
  16. Galiavetdinov N.R., Sabirova G.A., Safin R.R., Galikhanov M.F. Study of biodegradable wood-filled composite materials based on polylactide // *Derevoobrabatvaishaya promyshlennost'* (Woodworking industry). 2019. № 3. P. 61-68.
  17. Matuana L.M., Diaz C.A. Strategy To Produce Microcellular Foamed Poly (Lactic Acid) / Wood-Flour Composites in a Continuous Extrusion Process. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2013. 52. P. 12032-12040. URL: <https://doi.org/10.1021/ie4019462> (data obrashcheniya: 20.10.2023).
  18. Batista K.C., Silva D.A.K., Coelho L.A.F., Pezzin S.H., Pezzin A.P.T. Soil Biodegradation of PHBV / Peach Palm Particles Biocomposites. *J. Polym. Environ.* 2010. 18. P. 346-354. URL: <https://doi.org/10.1007/s10924-010-0238-4> (data obrashcheniya: 30.10.2023).
  19. Galiavetdinov N.R., Safin R.R., Talipova G.A., Petrov V.I. Study of the physical and mechanical properties of wood-filled composites based on polylactide with the aim of creating biodegradable packaging // *Derevoobrabatvaishaya promyshlennost'* (Woodworking industry). 2018. № 4. P. 12-18.
  20. Galiavetdinov N.R., Ilalova G.F., Mukhtarova A.R. Polylactide as a promising biodegradable polymer for wood-polymer composites // *Derevoobrabatvaishaya promyshlennost'* (Woodworking industry). 2017. № 3. P. 51-53.
  21. Galyavetdinov N.R., Talipova G.A., Safin R.R. Study of the destructive properties of biodegradable wood-filled composite material *Materials Science Forum*. 2020. V. 992. P. 290-295.
  22. Galiavetdinov N.R., Akhunova L.V. Analysis of the physical and mechanical properties of composites based on polylactide and thermally modified wood fibers // *Derevoobrabatvaishaya promyshlennost'* (Woodworking industry). 2016. № 1. P. 55-59.
  23. Safin R.R., Galiavetdinov N.R., Sabirova G.A., Kainov P.A., Kainov P.A., Mukhametjanov S.H.R., Ilalova G.F., Safullina A.K.H., Safina A.V., KHasanshina R.T. Method for producing a biodegradable polymer composition // Patent na izobrenenie 2750712 C1, 01.07.2021; zaiavka no 2020138804 ot 24.11.2020.
  24. Huang J.C., Shetty A.S., Wang M.S. Biodegradable plastic: A review. *Adv. Polym. Technol.* 1990. 10. P. 23-30. URL: <https://doi.org/10.1002/adv.1990.060100103> (data obrashcheniya: 20.10.2023).
  25. Shah A.A., Hasan F., Hameed A., Ahmed S. Biological Degradation of Plastics: A Comprehensive Review. *Biotechnol. Adv.* 2008. 26. P. 246-265. URL: <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2007.12.005> (data obrashcheniya: 30.10.2023).
  26. Arcos-Hernandez M.V., Laycock B., Pratt S., Donose B.C., Nikolic M.A.L., Luckman P., Werker A., Lant P.A. Biodegradation in a Soil Environment of Activated Sludge Derived Polyhydroxyalkanoate (PHBV). *Polym. Degrad. Stab.* 2012. 97. P. 2301-2312. URL: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2012.07.035> (data obrashcheniya: 30.10.2023).
  27. Reinsch V.E., Kelley S.S. Crystallization of Poly(Hydroxybutyrate-Co-Hydroxyvalerate) in Wood Fiber-Reinforced Composites. *J. Appl. Polym. Sci.* 1997. 64. P. 1785-1796. URL: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-4628\(19970531\)64:9%3c1785::AID-APP15%3e3.0.CO;2-X](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-4628(19970531)64:9%3c1785::AID-APP15%3e3.0.CO;2-X) (data obrashcheniya: 20.10.2023).
  28. Holmes P.A. Biologically Produced (R)-3-Hydroxyalkanoate Polymers and Copolymers. In *Developments in Crystalline Polymers*; Bassett, D. C. Ed.; Springer Netherlands: Dordrecht, 1988. P. 1-65.
  29. Nikodinovic-Runic J., Guzik M., Kenny S.T., Babu R., Werker A., KE O.C. Carbon-Rich Wastes as Feedstocks for Biodegradable Polymer (Polyhydroxyalkanoate) Production Using POLYMER RE-VIEWS 43 Downloaded by [Central Land Council Library] at 14:42 02 November 2017 *Bacteria. Adv. Appl. Microbiol.* 2013. 84. P. 139-200. URL: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-407673-0.00004-7> (data obrashcheniya: 22.10.2023).
  30. Arcos-Hernandez M.V., Laycock B., Donose B.C., Pratt S., Halley P., Al-Luaibi S., Werker A., Lant P.A. Physicochemical and Mechanical Properties of Mixed Culture Polyhydroxyalkanoate (PHBV). *Eur. Polym. J.* 2013. 49. P. 904-913. URL: <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2012.10.025> (data obrashcheniya: 20.10.2023).
  31. Reinsch V.E., Kelley S.S. Crystallization of Poly (Hydroxybutyrate-Co-Hydroxyvalerate) in Wood Fiber-Reinforced Composites. *J. Appl. Polym. Sci.* 1997. 64. P. 1785-1796. URL: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-4628\(19970531\)64:9%3c1785::AID-APP15%3e3.0.CO;2-X](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-4628(19970531)64:9%3c1785::AID-APP15%3e3.0.CO;2-X) (data obrashcheniya: 30.10.2023).
  32. Galiavetdinov N.R., Ilalova G.F., Saerova K.V., Pogodina I.A.D. Technology for the production of biodegradable composites for agricultural purposes // *Derevoobrabatvaishaya promyshlennost'* (Woodworking industry). 2022. № 3. P. 73-82.
  33. Safullina A.K.H., Ilalova G.F., KHalitov R.A., Petrov V.I. Current problems and prospects for the use of polyhydroxyalkanoates // *Derevoobrabatvaishaya promyshlennost'* (Woodworking industry). 2020. № 4. P. 62-69.
  34. Peterson S., Jayaraman K., Bhattacharyya D. Forming Performance and Biodegradability of Woodfibre-Biopole™ Composites, *Composites Part A.* 2002. 33. P. 1123-1134. URL: [https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(02\)00046-5](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(02)00046-5) (data obrashcheniya: 28.10.2023).
  35. Singh S., Mohanty A.K. Wood Fiber Reinforced Bacterial Bioplastic Composites: Fabrication and Performance Evaluation. *Compos. Sci. Technol.* 2007. 67. P. 1753-1763. URL: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2006.11.009> (data obrashcheniya: 28.10.2023).
  36. Singh S., Mohanty A.K., Misra M. Hybrid Bio-Composite from Talc, Wood Fiber and Bioplastic: Fabrication and Characterization. *Compos. Part A.* 2010. 41. P. 304-312. URL: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2009.10.022> (data obrashcheniya: 28.10.2023).
  37. Srubar W.V., Billington S.L. A Micromechanical Model for Moisture-Induced Deterioration in Fully Biorenewable Wood-Plastic Composites. *Compos. Part A.* 2013. 50. P. 81-92. URL: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2013.02.001> (data obrashcheniya: 28.10.2023).
  38. Bogracheva T.Y., Wang Y.L., Wang T.L., Hedley C.L. Structural studies of starches with different water contents. *Biopolymers.* 2002. 64 (5). P. 268-281.
  39. Zhang Y., Rempel C., Liu Q. Thermoplastic Starch Processing and Characteristics-a Review. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 2014. 54. P. 1353-1370. URL: <https://doi.org/10.1080/10408398.2011.636156> (data obrashcheniya: 24.10.2023).
  40. Chi H., Xu K., Wua X., Chen Q., Xue D., Song C., Zhang W., Wang P. Effect of acetylation on the properties of corn starch. *Food Chem.* 2008. 106. P. 923-928.
  41. Averous L., Fauconnier N., Moro L., Fringant C. Blends of thermoplastic starch and polyesteramide: Processing and properties. *J. Appl. Polym. Sci.* 2000. 76 (7). P. 1117-1128.
  42. Muller P., Renner K., Moczo J., Fekete E., Pukanszky B. Thermoplastic Starch / Wood Composites: Interfacial Interactions and Functional Properties. *Carbohydr. Polym.* 2014. 102. P. 821-829. URL: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.10.083> (data obrashcheniya: 30.10.2023).
  43. Lomeli-Ramirez M.G., Barrios-Guzman A.J., Garcia-Enriquez S., Rivera-Prado J.d.J., Manriquez-Gonzalez R. Chemical and Mechani-

- cal Evaluation of Bio-Composites Based on Thermoplastic Starch and Wood Particles Prepared by Thermal Compression. *Bioresources*. 2014. 9. P. 2960-2974. URL: <https://doi.org/10.15376/biores.9.2.2960-2974> (data obrashcheniya: 20.10.2023).
44. Curvelo A.A.S., de Carvalho A.J.F., Agnello J.A.M. Thermoplastic Starch-Cellulosic Fibers Composites: Preliminary Results. *Carbohydr. Polym.* 2001. 45. P. 183-188. URL: [https://doi.org/10.1016/S0144-8617\(00\)00314-3](https://doi.org/10.1016/S0144-8617(00)00314-3) (data obrashcheniya: 20.10.2023).
45. Cobut A., Sehaqui H., Berglund L.A. Cellulose Nanocomposites by Melt Compounding of TEMPO-Treated Wood Fibers in Thermoplastic Starch Matrix. *Bioresources*. 2014. 9. P. 3276-3289. URL: <https://doi.org/10.15376/biores.9.2.3276-3289> (data obrashcheniya: 28.10.2023).
46. Żelaziński T., Ekielski A., Tulska E., Vladut V., Durczak K. Wood dust application for improvement of selected properties of thermoplastic starch. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Wood-dust-application-for-improvement-of-selected-%C5%BBelazi%C5%84ski-Ekielski/95edffacdbc920d12d3ed9c0b074149c308ac29e> (data obrashcheniya: 28.10.2023).
47. Teramoto N., Urata K., Ozawa K., Shibata M. Biodegradation of Aliphatic Polyester Composites Reinforced by Abaca Fiber. *Polym. Degradation Stab.* 2004. 86. P. 401-409. URL: <https://doi.org/10.1016/j.polyimdegradstab.2004.04.026> (data obrashcheniya: 28.10.2023).
48. Guo W., Tao J., Yang C., Song C., Geng W., Li Q., Wang Y., Kong M., Wang S. Introduction of Environmentally Degradable Parameters to Evaluate the Biodegradability of Biodegradable Polymers. *PLoS One*. 2012. 7. e38341. URL: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0038341> (data obrashcheniya: 30.10.2023).
49. Novakov I.A., Kablov V.F., Petriuk I.P. Micro- and nanostructure and properties of elastomeric materials. Volgorad: VolgGTU, 2012. 112 p.
50. Safin R.R., Lyamina L.V., Safina A.V., Mukhametzyanov S.R. Investigation of the rate of vacuum-conductive drying of wood-particle panels based on polyvinyl alcohol *Key Engineering Materials*. 2021. V. 887 KEM. P. 466-472.
51. Guruprasad K.H., Shashidhara G.M. Grafting, Blending, and Biodegradability of Cellulose Acetate. *J. Appl. Polym. Sci.* 2004. 91. P. 1716-1723. URL: <https://doi.org/10.1002/app.13386> (data obrashcheniya: 28.10.2023).

УДК 004.584

DOI: 10.18324/2077-5415-2023-4-169-175

## Реализация сегментации деревьев для системы поддержки принятия решений оператора лесозаготовительной машины

Д.И. Рогачев<sup>a</sup>, В.Е. Клубничкин<sup>b</sup>

Мытищинский филиал Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, ул. 1-я Институтская, 1, Мытищи, Россия

<sup>a</sup>rogachevdi@bmstu.ru, <sup>b</sup>vklubnichkin@gmail.com

<sup>a</sup><https://orcid.org/0000-0002-7807-5294>, <sup>b</sup><https://orcid.org/0000-0002-1231-8185>

Статья поступила 01.10.2023, принята 16.10.2023

*Лесозаготовительные машины играют важную роль в современной лесной промышленности, обеспечивая эффективное извлечение древесины. Операторы этих машин сталкиваются с разнообразными условиями работы, включая сложную местность и густой лесной покров. В таких условиях система поддержки принятия решений должна стать неотъемлемой частью работы оператора. Один из важных этапов в разработке такой системы — это сегментация деревьев с целью определения их параметров для дальнейшего представления информации оператору. Сегментация деревьев является процессом выделения индивидуальных деревьев из облака точек, получаемого с помощью технологии LiDAR. Для реализации сегментации предполагается применение нейронной сети, как пример — PointPillars, вследствие чего возникает потребность в формировании обучающих данных. Для формирования обучающей библиотеки необходимо производить наземное сканирование и ручную сегментацию деревьев, что достаточно ресурсоемко. В статье предлагается подход для создания библиотеки на основе синтетических данных, генерируемых при помощи Unreal Engine 4.26. Трехмерная модель ствола дерева представляется в виде тела вращения, контур которого воссоздан с помощью уравнения образующей древесного ствола.*

**Ключевые слова:** PointPillars; LiDAR; беспилотный харвестер; сегментация деревьев; Unreal Engine.

## Implementation of tree segmentation for the decision support system of the logging machine operator

D.I. Rogachev<sup>a</sup>, V.E. Klubnichkin<sup>b</sup>

Mytishchi Branch of the Bauman Moscow State Technical University; 1, 1st Institutskaya St., Mytishchi, Russia

<sup>a</sup>rogachevdi@bmstu.ru, <sup>b</sup>vklubnichkin@gmail.com

<sup>a</sup><https://orcid.org/0000-0002-7807-5294>, <sup>b</sup><https://orcid.org/0000-0002-1231-8185>

Received 01.10.2023, accepted 16.10.2023