

УДК 547.458.61

DOI 10.62595/1819-5245-2025-1-76-84

БИОРАЗЛАГАЕМЫЕ КОМПОЗИТЫ НА ОСНОВЕ АЦЕТОБУТИРАТА ЦЕЛЛЮЛОЗЫ И ОРГАНИЧЕСКИХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ

**Е. Н. ПОДДЕНЕЖНЫЙ, Н. Е. ДРОБЫШЕВСКАЯ, А. А. БОЙКО,
М. Ф. С. Х. АЛЬ-КАМАЛИ**

*Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П. О. Сухого»,
Республика Беларусь*

В. М. ШАПОВАЛОВ

*Государственное научное учреждение «Институт
механики металлополимерных систем имени В. А. Белого
НАН Беларуси», г. Гомель*

Биоразлагаемые композиты на основе ацетобутирата целлюлозы (АБЦ) и органических наполнителей получены в форме экструзионных лент. В качестве органических наполнителей использованы кукурузный крахмал и рисовая лузга. Установлено, что композитный материал в системе «АБЦ – пластификатор – крахмал» содержит частицы крахмала, расположенные в полимерной матрице достаточно однородно, причем частицы крахмала встраиваются в матрицу с использованием биндера – смеси триацетина и глицеролмоностеарата. Определено, что композит, содержащий крахмал и рисовую лузгу, характеризуется неоднородным распределением наполнителей. Отмечено, что полученные образцы подвергали биоразложению в компосте в лабораторных условиях.

Ключевые слова: биоразлагаемые композиты, ацетобутират целлюлозы, крахмал, рисовая лузга, экструзия.

Для цитирования. Биоразлагаемые композиты на основе ацетобутирата / Е. Н. Подденежный, Н. Е. Дробышевская, А. А. Бойко, М. Ф. С. Х. Аль-Камали // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2025. – № 1 (100). – С. 76–84. – DOI 10.62595/1819-5245-2025-1-76-84

BIODEGRADABLE COMPOSITES BASED ON CELLULOSE ACETOBUTYRATE AND ORGANIC FILLERS

**E. N. PODDENEZHNY, N. E. DROBYSHEVSKAYA, A. A. BOIKA,
M. F. S. H. AL'-KAMALI**

*Sukhoi State Technical University of Gomel,
the Republic of Belarus*

V. M. SHAPOVALOV

*State Scientific Institution “V. A. Belyi Metal-Polymer
Research Institute of the National Academy of Sciences
of Belarus”, Gomel*

Biodegradable composites based on cellulose acetobutyrate (CAB) and organic fillers were obtained in the form of extruded tapes. Corn starch and rice husk were used as organic fillers. It was established that in the CAB – plasticizer – starch system, starch particles are relatively homogeneously distributed within the polymer matrix, with their integration facilitated by a binder composed of triacetin and glycerol

monostearate. In contrast, the composite containing both starch and rice husk exhibited a heterogeneous filler distribution. It was also noted that the obtained samples underwent biodegradation in compost under laboratory conditions.

Keywords: biodegradable composites, cellulose acetobutyrate, starch, rice husk, extrusion.

For citation. Poddenezny E. N., Drobyshevskaya N. E., Boyko A. A., Al'-Kamali M. F. S. H. Biodegradable composites based on cellulose acetobutyrate and organic fillers. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni P. O. Sukhogo*, 2025, no. 1 (100), pp. 76–84 (in Russian). DOI 10.62595/1819-5245-2025-1-76-84

Введение

В последние годы идет интенсивный поиск новых биоразлагаемых полимеров и композитов на их основе, пригодных для производства экологически чистых, деградируемых в природных условиях упаковочных изделий и одноразовой посуды [1–3].

Среди большого количества биополимеров, предлагаемых на рынке, перспективной представляется группа производных целлюлозы – сложных эфиров: ацетата, диацетата, триацетата, ацетобутирата, ацетопропионата. Ацетобутират целлюлозы (АБЦ) – эфир целлюлозы, который содержит как ацетатные так и бутиратные группы. Плотность – 1,8–1,21 г/см³, $T_{пл} = 155–165\text{ }^{\circ}\text{C}$ [4].

В производстве АБЦ в качестве этерифицирующего агента используют смесь уксусной и масляной кислот. Ацетобутират целлюлозы характеризуется большей термостойкостью, стойкостью к воздействию химических реагентов, минеральных масел, воды, чем ацетат и диацетат целлюлозы. Хорошо совмещается с пластификаторами. Однако период разложения эфиров целлюлозы в почве или компосте является достаточно длительным, поэтому большое внимание в научном сообществе уделяется различного рода композитам с органическими и минеральными наполнителями, разрыхляющими структуру и способствующими ускоренному биоразложению [5–8].

В отличие от абсолютного большинства пластмасс биоразлагаемые полимеры могут расщепляться в условиях окружающей среды путем реакций гидролиза и окисления, а также с помощью микроорганизмов, таких как бактерии, грибы или водоросли. Полимер или композит, как правило, считается биоразлагаемым, если вся его масса разлагается в почве или воде за период в шесть месяцев (ISO 16929 : 2013, ГОСТ Р 57226-2016). В случае аэробного разложения продуктами распада являются углекислый газ, вода и гумус [9, 10].

Целлюлоза легко разлагается организмами, которые используют ферменты целлюлазы, но из-за наличия дополнительных ацетильных групп ацетат целлюлоза требует присутствия эстераз на первом этапе биodeградации. Как только происходит частичное деацетилирование либо ферментами, либо частичным химическим гидролизом, целлюлозная основа полимера легко подвергается биологическому разложению. Способность к фоторазрушению может быть значительно улучшена за счет добавления диоксида титана, который вызывает образование точечных пятен на поверхности, что увеличивает площадь поверхности материала и усиливает биodeградацию. Сочетание фото- и биodeградации обеспечивает синергию, которая повышает общую скорость разложения [11].

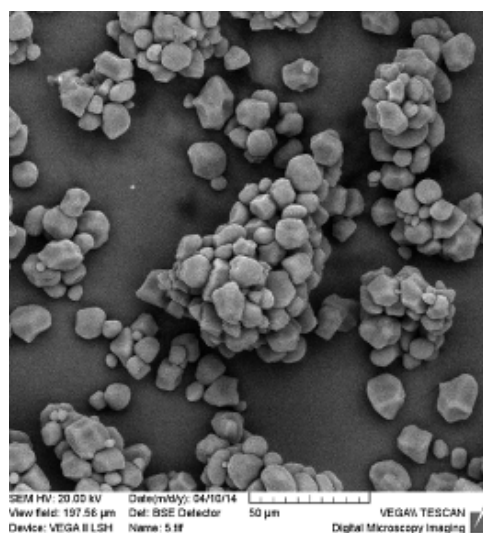
Однако при создании композиционных материалов на основе ацетатов целлюлозы возникают проблемы совмещения гидрофобной полимерной матрицы с гидрофильными частицами наполнителя [12].

Настоящая работа посвящена изучению перспективных составов и исследованию некоторых свойств биоразлагаемых композитов на основе смесей АБЦ и органических наполнителей – кукурузного крахмала и рисовой лузги.

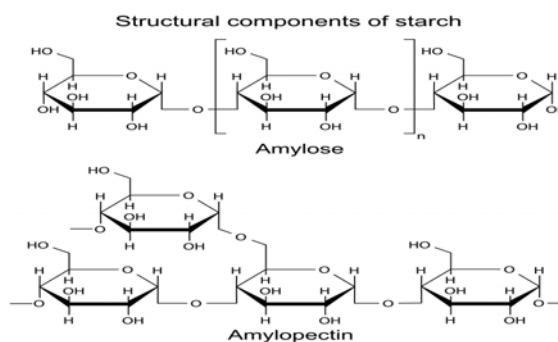
Материалы и методы исследований

Для получения экспериментальных ленточных образцов биоразлагаемых материалов на основе смеси АБЦ и органических наполнителей были использованы следующие исходные материалы: гранулированный АБЦ марки САВ 381-20 (Actis Chemicals, Китай), кукурузный крахмал (ГОСТ Р 51953-2002), молотая рисовая лузга, триацетин пищевой квалификации (LMFlex Technology CO, Китай) – в качестве пластификатора, моностеарат глицерина HG-60 (Shandong Watch New Materials Group Co., Ltd, Китай) как поверхностно-активное вещество (ПАВ) и диоксид титана в кристаллической модификации анатаза TiONA AT-1 ГОСТ 9808-84.

Крахмал – полисахарид, накапливаемый в процессе жизнедеятельности растений в их клубнях, семенах, стеблях и листьях. Основными источниками для его промышленного производства являются картофель, рис, пшеница, кукуруза. В кукурузных зернах крахмал присутствует в виде гранул, размер которых колеблется от 5 до 10 мкм. При хранении частицы крахмала слипаются между собой, образуя агломераты, которые легко диспергируются при механических усилиях (рис. 1, а) [13]. С химической точки зрения крахмал состоит из смеси полисахаридов, которые можно разделить на две фракции – амилозу и амилопектин, отличающиеся строением входящих в их состав углеводов (рис. 1, б) [14].



а)



б)

Рис. 1. СЭМ-изображение гранул кукурузного крахмала (а); химическое строение крахмала (б)

Рисовая лузга (шелуха) обладает рядом уникальных свойств и является одним из перспективных природных наполнителей для биоразлагаемых композитов [15]. По химическому составу она близка к древесине и включает в себя целлюлозу (28–48 %), лигнин (12–16 %) и гемицеллюлозу (23–28 %) [16]. В отличие от древесины в рисовой лузге содержится до 19 % кремнезема, что обеспечивает ей повышенную термостойкость. Поэтому лузга выдерживает нагрев до 200 °С, что позволяет ее использовать в экструдированных композитах с относительно термостойкими матрицами – полипропиленом, полиамидом, АБЦ. Рисовая лузга легко измельчается на шаровых и центробежных мельницах до состояния порошка с размерами частиц 80–140 мкм (рис. 2).

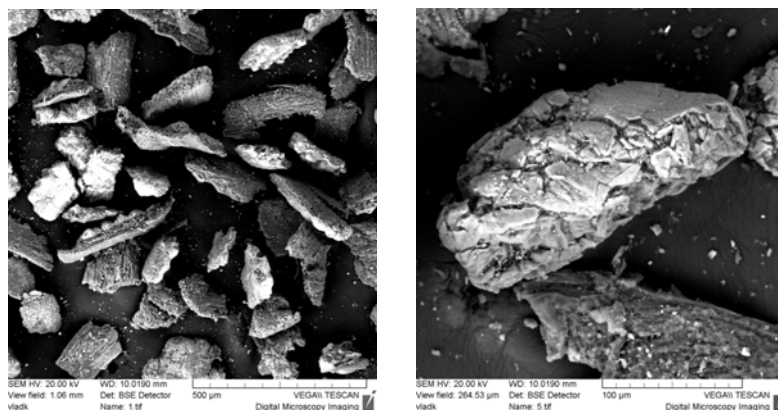


Рис. 2. СЭМ-изображение молотого порошка рисовой лузги (размер частиц – 100–140 мкм) при разном увеличении

Триацетин (глицерил триацетат) – эффективный пластификатор для эфиров целлюлозы; химическая формула: $C_9H_{14}O_6$; представляет собой слегка маслянистую жидкость; плотность – $1,16 \text{ г/см}^3$; $T_{пл} = 78^\circ\text{C}$; хорошо растворим в органических жидкостях, средне – в воде; имеет характерный слабовыраженный запах; зарегистрирован как пищевая добавка E1518.

Моностеарат глицерина – химическая формула: $C_{21}H_{42}O_4$; является глицериновым эфиром стеариновой кислоты; неионогенное ПАВ; $T_{пл} = 64,5^\circ\text{C}$; использовался в композиции для улучшения совместимости ацетобутирата целлюлозы и частиц крахмала, а также для гомогенизации расплава; зарегистрирован в качестве пищевой добавки E471; является биоразлагаемым химическим соединением.

Используемый в составе композиционного материала диоксид титана в кристаллической форме анатаза – фотоактивный агент; также известен как краситель белого цвета; классифицируется в качестве пищевой добавки E171.

Ленточные образцы композитов вытягивали на одношнековом экструдере НААКЕРНЕОСОРД 90 (Германия); диаметр шнека – 20 мм; длина шнека – 500 мм; скорость вращения – 50 об/мин. Показатель текучести расплава определяли с помощью прибора ИИРТ-М5. Испытания на прочность до разрыва и относительное удлинение образцов осуществляли на разрывной машине Instron 5969 при комнатной температуре. Испытания на водопоглощение образцов проводили в соответствии с ГОСТ 4650-80, а на способность к биоразложению в компосте – по ГОСТ Р 57226-2016.

Экспериментальная часть

Были изготовлены две серии образцов разного состава: первая серия (мас. %): АБЦ – 40–60; крахмал – 20–45; триацетин – 10–15; моностеарат глицерина – 5; диоксид титана – 2 мас. % сверх 100 % основного состава; вторая серия: АБЦ – 50; крахмал – 10; рисовая лузга – 20; триацетин – 10; моностеарат глицерина – 5.

Биоразлагаемый композит изготавливали по следующей схеме.

Предварительно осуществляется сушка рисовой лузги при температуре 90–100 °С в течение 6 ч, размол на центробежной мельнице и рассев до состояния порошка с размерами частиц 100–140 мкм.

Гранулы АБЦ загружают в скоростной турбосмеситель при температуре 25 °С, орошают гранулы жидким пластификатором – триацетином при непрерывном вращении мешалки, затем загружают порошок крахмала и рисовую лузгу, добавляют моностеарат глицерина. Далее нагревают смесь при вращении мешалки до темпера-

туры 90 °С для получения гомогенной смеси и удаления избыточной влаги в течение 20–30 мин, затем охлаждают смесь до температуры 25–30 °С и после этого шихту загружают в экструдер для гомогенизации и получения расплава. Далее расплав из щелевой головки поступает на каландр, охлаждается и в виде ленты толщиной 0,5–0,6 мм и шириной 100 мм закручивается в рулон. Из полученных лент (рис. 3, а, 4, а) изготавливают образцы для испытаний.

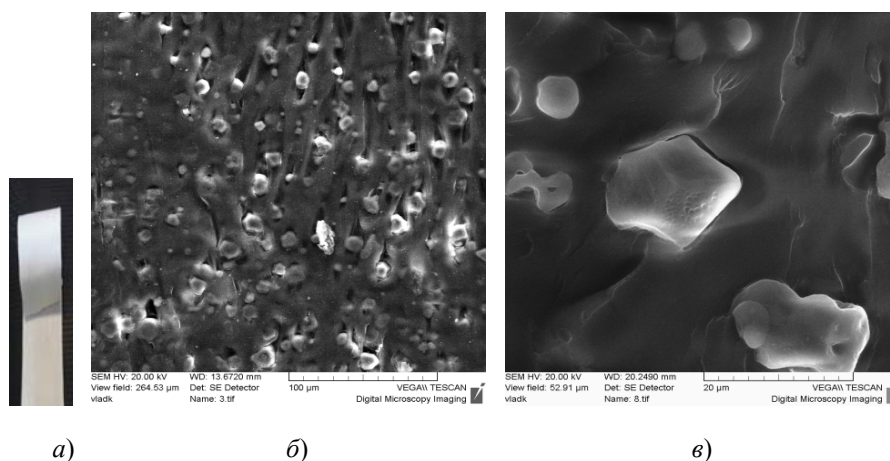


Рис. 3. Образец экструзионной ленты с наполнителем – кукурузным крахмалом (45 %) (а); СЭМ-тизображение: скола, полученного путем разрушения образца в жидком азоте (б); частицы крахмала в матрице АБЦ (в)

Из анализа электронно-микроскопических снимков ленточного композита с наполнением крахмалом можно сделать заключение, что наличие в исходной смеси пластификатора, триацетина- и биндера – моностеарата глицерина способствует формированию гетерогенной системы, в которой частицы крахмала статистически распределены в матрице и практически полностью совмещаются с основой рис. 3, б, в).

Образцы композитов с совместным введением крахмала и рисовой лузги обладают неоднородной структурой, однако частицы лузги также встраиваются в матрицу АБЦ, что связано с наличием в составе лузги целлюлозы и лигнина (рис. 4, б, в).

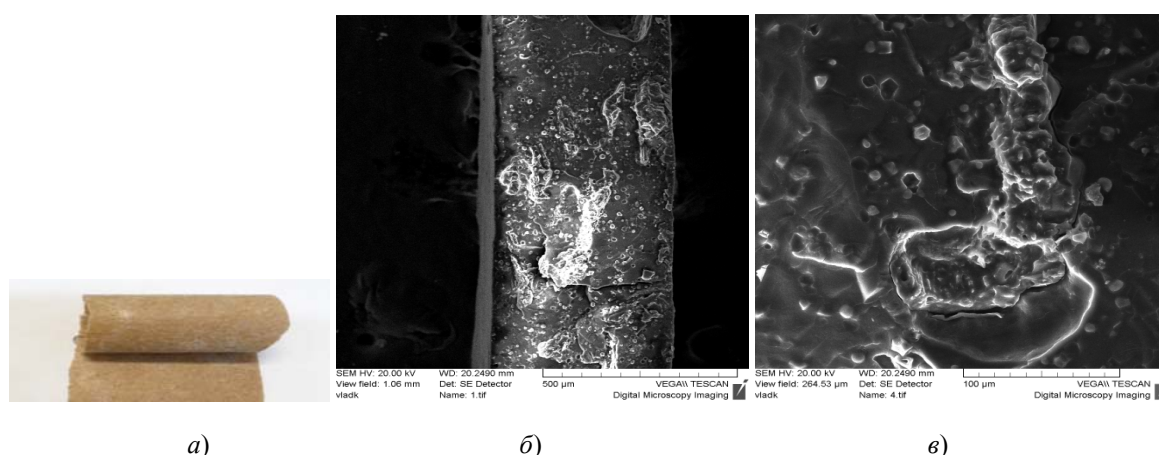


Рис. 4. Образец экструзионной ленты с наполнителями – кукурузным крахмалом и рисовой лузгой (а); СЭМ-изображение: скола, полученного путем разрушения образца в жидком азоте (б); частицы крахмала и лузги в матрице АБЦ (в)

Полученные образцы материала лент подвергали механическим, гидрологическим и биологическим испытаниям, результаты которых приведены в таблице.

Технические результаты измерений параметров образцов

Определяемые параметры	Методы испытаний	(Контроль) АБЦ САВ 381-20	Параметры для ленты, содержащей крахмал	Параметры для ленты, содержащей крахмал и лузгу
Плотность, г/см ³	ГОСТ 11645-73	1,21	1,05–1,1	1,2
Прочность при разрыве, МПа	ГОСТ 11262-2017	43	25–35	28
Температура размягчения, °С	ГОСТ 15088-2014	115	80	90
Водопоглощение за 24 ч, мас. %	ГОСТ 4650-80	0,1	6,5–8,0	9,5
Степень разложения – 100 % за определенный период, мес.	ГОСТ Р 57226-2016	12–13	5	6

Плотность образцов определяли по ГОСТ 11645-73 при комнатной температуре. Разрушающее напряжение при растяжении (δ_r) измеряли по ГОСТ 11262-2017. Водопоглощение (Δm , %) оценивали по приросту массы образцов в результате экспозиции в воде за 24 ч: $\Delta m = (m_\tau - m_0) / m_0 \cdot 100$ %, где m_0 и m_τ – масса образца начальная и в момент времени τ соответственно (ГОСТ 4650-80). Степень биоразложения материалов композиции определяли по стандартным условиям компостирования.

Из данных таблицы видно, что механические параметры лент, получаемых со смешанным наполнителем – крахмалом и рисовой лузгой, ниже, чем у материала с крахмалом. Это связано, скорее всего, с более крупными размерами частиц рисовой лузги и наличием микропор на границах раздела матрица – наполнитель.

По результатам гидролитических и биологических испытаний было установлено, что биоразлагаемые композиты, содержащие крахмал, рисовую лузгу и вспомогательные компоненты, разлагаются в компосте значительно быстрее, чем чистый АБЦ. Крахмал и особенно пористая молотая лузга увеличивают водопоглощение материала, что способствует его разрушению. Стадии разложения можно описать следующим образом. Вначале следует образование микротрещин на поверхности и проникновение влаги вглубь образца. Далее происходит набухание частиц крахмала и лузги и растрескивание композиционного материала. Крупные и мелкие фрагменты в компосте или влажной почве подвергаются интенсивному воздействию микроорганизмов. Микрофрагменты с молекулярной массой около 5000 и ниже усваиваются почвенными микроорганизмами с выделением CO₂, H₂O и гумуса, являющихся, в свою очередь, питательной средой для микрофлоры почвы. В случае нахождения изделия из композита на поверхности влажной почвы и попадании УФ-излучения на частицы анатаза TiO₂, происходит образование дополнительных подвижных радикалов, которые вступают во взаимодействие с полимерными цепочками и вызывают их деструкцию до низкомолекулярных фрагментов [16].

Таким образом, в результате исследований созданы термопластичные композиты двух серий на основе ацетобутирата целлюлозы: первая серия включает АБЦ (40–60 мас. %); крахмал (20–45 мас. %); триацетин в качестве пластификатора (10–15 мас. %) и технологические добавки – моностеарат глицерина (5 мас. %);

диоксид титана (2 мас. %) сверх 100 % основного состава; вторая серия включает АБЦ (50 мас. %); крахмал (10 мас. %); рисовую лузгу (20 мас. %); триацетин (10 мас. %); моностеарат глицерина (5 мас. %).

Полученные композиты имеют достаточно удовлетворительные механические характеристики, размягчаются при температуре 80–90 °С и полностью распадаются под действием влаги и микробиологической среды компоста или влажной почвы за период от 5 до 6 мес.

Заключение

Таким образом, в результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. В лабораторных условиях проведены эксперименты по получению биоразлагаемых композитов на основе системы «АБЦ – пластификатор – органические наполнители» в форме экструзионных лент толщиной 0,5 мм. В качестве органических наполнителей использовали кукурузный крахмал и молотую рисовую лузгу

2. Показано, что механическая прочность ленточных образцов меньше, чем чистого АБЦ, зависит от типа наполнителей и уменьшается с введением крупных частиц рисовой лузги.

3. Установлено, что образцы биоразлагаемых материалов, полученные с использованием АБЦ и наполнителей, обладают значительным водопоглощением, что способствует ускоренному гидро- и биологическому разложению композита в условиях компостирования.

4. Предлагаемая композиция обладает температурой размягчения не менее 80–90 °С и биологической разрушаемостью в компосте или влажной почве в течение 5–6 мес.

Работа выполнена в рамках задания 8.4.1.17 «Создание биоразлагаемых композиционных материалов с использованием промышленных и сельскохозяйственных отходов» ГПНИ «Материаловедение, новые материалы и технологии» подпрограмма «Многофункциональные и композиционные материалы», финансируемого из средств республиканского бюджета по государственным программам научных исследований на 2021–2025 гг. в Республике Беларусь.

Литература

1. Масанов, А. Ю. Биоразлагаемые пластики: текущее состояние рынков и перспективы / А. Ю. Масанов // Вестник химической промышленности. – 2017. – № 7. – С. 1–92.
2. Утилизация упаковочных материалов как основа экологической безопасности: биоразлагаемые и съедобные материалы / И. Ю. Ухарцева, Е. А. Цветкова, В. А. Гольдаде, В. М. Шаповалов // Вестник Гродненского государственного университета имени Янки Купалы. Серия 6, Техника. – 2022. – Т. 12, № 1. – С. 74–89.
3. Шаповалов, В. М. Биоразлагаемые пластики на основе растительного сырья: разновидности, свойства, области применения (обзор) / В. М. Шаповалов, Н. С. Винидиктова, М. А. Коваленко, О. В. Конакова // Полимерные материалы и технологии. – 2024. – Т. 10, № 2. – С. 6–19. – DOI 10.32864/polymmattech-2024-10-2-6-19
4. Cellulose acetatebutyrate / Wikipedia. – URL: <https://en.wikipedia.org> (дата обращения: 15.02.2025).
5. Wojciechowska, P. Synthesis of organic-inorganic hybrids based on cellulose acetate butyrate / P. Wojciechowska, Z. Foltynowicz // Polimery. – 2009. – N 11-12. – P. 845–848.
6. All-cellulose nanocomposite fibers produced by melt spinning cellulose acetate butyrate and cellulose nanocrystals / S. Hooshmand, Y. Aitomäki, M. Skrifvars [et al.] // Cellulose. – 2014. – Vol. 21. – P. 2665–2678.

7. Patent US 20210171740 A 1. Impact-Modified Biodegradable Polymer Compositions biodegradable composition based on cellulose acetate butyrate : publ. date 10.06.2021.
8. Enhanced mechanical properties of biodegradable poly(ϵ -caprolactone)/cellulose acetate butyrate nanocomposites filled with organoclay / Bo Zhu, Xiuwei Wang, Qianqian Zeng [et al.] // *Composites Communications*. – 2019. – Vol. 13, N 6. – P. 70–74.
9. Degradability of organic-inorganic cellulose acetate butyrate hybrids in sea water / P. Wojciechowska, A. Heimowska, Z. Foltynowicz, M. Rutkowska // *Polish Journal of Chemical Technology*. – 2011. – Vol. 13, N 2. – P. 29–34.
10. Биопластики на основе термопластов: механизм биодеградации / А. А. Ольхов, А. Л. Иорданский, Г. Е. Заиков, О. Ю. Емелина // *Вестник Казанского технологического университета*. – 2014. – Т. 17, № 13. – С. 245–249.
11. Juergen, P. Degradation of Cellulose Acetate-Based Materials: A Review / P. Juergen, A. Steven, H. Dirk // *Journal of Environmental Polymer Degradation*. – 2011. – Vol. 19, N 1. – P. 152–165. – DOI 10.1007/s10924-010-0258
12. Ayuk, J. E. The Effect of Plasticizer and Cellulose Nanowhisker Content on the Dispersion and Properties of Cellulose Acetate Butyrate Nanocomposites / J. E. Ayuk, A. P. Mathew, K. Oksman // *Journal of Applied Polymer Science*. – 2009. – Vol. 114. – P. 2723–2730.
13. Прогресс в получении биоразлагаемых композиционных материалов на основе крахмала / Е. Н. Подденежный, А. А. Бойко, А. А. Алексеенко [и др.] // *Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого*. – 2015. – № 2. – С. 31–41.
14. Robyt, J. F. Starch: Structure, Properties, Chemistry, and Enzymology / J. F. Robyt // In book: *Glycoscience*. – Berlin ; Heidelberg : Springer, 2008. – P. 1437–1472. – DOI 10.1007/978-3-540-30429-6_35
15. Mechanical, water absorption, and morphology of recycled polymer blend rice husk flour biocomposites / R. S. Chen, M. H. Ab Ghani, M. N. Salleh [et al.] // *Journal of Applied Polymer Science*. – 2015. – Vol. 132, N 8. – P. 1–12.
16. Наполнители аграрного происхождения для древесно-полимерных композитов / А. Е. Шкуро, В. В. Глухих, П. С. Кривоногов, О. В. Стоянов // *Вестник Казанского технологического университета*. – 2014. – Т. 17, № 21. – С. 160–163.

References

1. Masanov A. Yu. Biodegradable plastics: current market status and prospects. *Vestnik khimicheskoy promyshlennosti = Bulletin of the Chemical Industry*, 2017, no. 7, pp. 1–9 (in Russian).
2. Ukhartseva I. Yu., Tsvetkova E. A., Gol'dade V. A., Shapovalov V. M. Disposal of packaging materials as a basis for environmental safety: biodegradable and edible materials. *Vestnik Grodnenskogo gosudarstvennogo universiteta im. Yanki Kupali. Ser. 6. Tehnika = Bulletin of the Grodno State University named after Yanka Kupala. Ser. 6, Technique*, 2022, vol. 12, no. 1, pp. 74–89 (in Russian).
3. Shapovalov V. M., Vinidiktova N. S., Kovalenko M. A., Konakova O. V. Plant-based biodegradable plastics: varieties, properties, applications. *Polimernie materialy i tehnologii = Polymer materials and technologies*, 2024, vol. 10, no. 2, pp. 6–19 (in Russian). DOI 10.32864/polymmattech-2024-10-2-6-19
4. Cellulose acetatebutyrate. URL: <https://en.wikipedia.org> (accessed 10 August 2024).
5. Wojciechowska P., Foltynowicz Z. Synthesis of organic-inorganic hybrids based on cellulose acetate butyrate. *Polimery = Polymers*, 2009, no. 11–12, pp. 845–848.
6. Hooshmand S., Aitomäki Y., Skrifvars M., Mathew A. P., Oksman K. All-cellulose nanocomposite fibers produced by melt spinning cellulose acetate butyrate and cellulose nanocrystals. *Cellulose*, 2014, vol. 21, pp. 2665–2678.

7. Impact-Modified Biodegradable Polymer Compositions biodegradable composition based on cellulose acetate butyrate. Patent Soedinennye Shtaty Ameriki. no. 20210171740A1, 2020.
8. Zhu Bo, Wang Xiuwei, Zeng Qianqian, Wang Pan, Wang Yaming, Liu Chuntai, Shen Changyu. Enhanced mechanical properties of biodegradable poly(ϵ -capro-lactone)/cellulose acetate butyrate nanocomposites filled with organoclay. *Composites Communications*, 2019, vol. 13, pp. 70–74.
9. Wojciechowska P., Heimowska A., Foltynowicz Z., Rutkowska M., Degradability of organic-inorganic cellulose acetate butyrate hybrids in sea water. *Polish Journal of Chemical Technology*, 2011, vol. 13, no. 2, pp. 29–34.
10. Olhov A. A., Iordanskii A. L., Zaikov G. E., Emelina O. Yu. Thermoplastic-based bioplastics: mechanism of biodegradation. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta = Bulletin of Kazan Technological University*, 2014, vol. 17, no. 13, pp. 245–249 (in Russian).
11. Juergen P., Steven A., Dirk H. Degradation of Cellulose Acetate-Based Materials: A Review. *Journal of Environmental Polymer Degradation*, 2011, vol. 19, no. 1, pp. 152–165. DOI 10.1007/s10924-010-0258-0
12. Ayuk J. E., Mathew A. P., Oksman K. The Effect of Plasticizer and Cellulose Nanowhisker Content on the Dispersion and Properties of Cellulose Acetate Butyrate Nanocomposites. *Journal of Applied Polymer Science*, 2009, vol. 114, pp. 2723–2730.
13. Poddenezhnyj E. N., Boiko A. A., Alekseenko A. A., Drobysheskaja N. E., Uretskaja O. V. Progress in starch-based biodegradable composite materials. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni P. O. Sukhogo*, 2015, no. 2, pp. 31–41 (in Russian).
14. Robyt J. F. Starch: Structure, Properties, Chemistry, and Enzymology. In book *Clycoscience*, Springer, Berlin, Heidelberg Publ., 2008, pp. 1437–1472. DOI 10.1007/978-3-540-30429-6-35
15. Chen R. S., Ghani M. H. Ab., Salleh M. N. Mechanical, water absorption, and morphology of recycled polymer blend rice husk flour biocomposites. *Journal of Applied Polymer Science*, 2015, vol. 132, no. 8, pp. 1–12.
16. Shkuro A. E., Gluchih V. V., Krivonogov P. S., S'ojajnova O. V. Agrarian fillers for wood-polymer composites. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2014, vol. 17, no. 21, pp. 160–163 (in Russian).

Поступила 28.02.2025 г.