https://doi.org/10.36107/hfb.2023.i2.s171

УДК 678.21.38

# Исследование возможности использования биоразлагаемых целлюлозосодержащих материалов на основе мискантуса в качестве одноразовой посуды и упаковки пищевых продуктов

И. А. Кирш, И. С. Тверитникова, В. В. Баталова

Российский биотехнологический университет («РОСБИОТЕХ»), Москва, Россия

**Корреспонденция:**
**Тверитникова Изабелла Сергеевна,**
Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ),
125080, Россия, г. Москва, Волоколамское шоссе, 11
E-mail: tveritnikova@mgupp.ru

**Конфликт интересов:**
авторы сообщают об отсутствии конфликта интересов.

**Поступила**: 17.07.2023

**Поступила после рецензирования:** 13.09.2023

**Принята**: 21.09.2023

**Copyright:** © 2023 Авторы

**АННОТАЦИЯ**

**Введение.** В настоящее время одним из приоритетных направлений развития науки и техники в области экологии и охраны окружающей среды является разработка биоразлагаемых материалов.

**Цель.** Целью работы является исследование целлюлозосодержащих материалов для определения возможности их использования в качестве упаковочных материалов пищевых продуктов и одноразовой посуды.

**Материалы и методы.** В качестве объектов исследования были выбраны материал на основе мискантуса и материал на основе беленой целлюлозы. Исследования проводились в центре коллективного пользования на базе Российского биотехнологического университета. В работе исследовали барьерные свойства, деформационно-прочностные характеристики, санитарно-гигиенические показатели и способность к биоразложению.

**Результаты.** Материал из мискантуса имеет более высокие показатели физико-механических свойств по сравнению с целлюлозным материалом из древесины. Проницаемость для паров воды, по кислороду, а также жиростойкость всех исследуемых образцов невысокая. Исследуемые материалы являются нежиростойкими и не рекомендуются для пищевых продуктов с высоким содержанием жира. При исследовании образцов в жидкой среде биогумус было отмечено, что образцы из древесной целлюлозы и из мискантуса разложились в модельной среде на 8 неделе. Определено, что образцы материала из мискантуса разлагаются полностью за 6 недель компостирования, образцы материала из древесной целлюлозы — после 12 недели. Исследования лабораторных образцов по техническому регламенту таможенного союза 005/2011 «О безопасности упаковки» установили, что предельно допустимые концентрации выделившихся низкомолекулярных веществ не превышают установленную норму, и такую упаковку можно использовать для контакта с пищевыми продуктами.

**Выводы.** В результате исследования качества целлюлозных материалов определено, что качество изделий удовлетворительное: дефектов нет, повреждений нет, включений нет. По результатам проведенных исследований определено соответствие образцов целлюлозных тарелок нормам ТР ТС 005/2011. Данные целлюлозосодержащие материалы можно использовать в качестве упаковочных материалов пищевых продуктов и одноразовой посуды.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА**

материал из мискантуса, материал из древесной целлюлозы, биоразложение, барьерные свойства, деформационно-прочностные характеристики

**Для цитирования:** Кирш, И. А., Тверитникова, И. С., Баталова, В. В. (2023). Исследование возможности использования биоразлагаемых целлюлозосодержащих материалов на основе мискантуса в качестве одноразовой посуды и упаковки пищевых продуктов. *Health, Food & Biotechnology, 5*(2), 28-38. https://doi.org/10.36107/hfb.2023.i2.s171

BIOTECHNOLOGY

https://doi.org/10.36107/hfb.2023.i2.s171

# Feasibility Study of Biodegradable Cellulose-Containing Materials Based on Miscanthus as Disposable Tableware and Food Packaging

Irina A. Kirsh, Izabella S. Tveritnikova, Valentina V. Batalova

Russian Biotechnological University (BIOTECH University), Moscow, Russia

**Correspondence:**
**Izabella S. Tveritnikova**
Russian Biotechnological University, 11, Volokolamskoe highway, Moscow, 125080, Russia
E-mail: tveritnikova@mgupp.ru

**Declaration of competing interest:** none declared.

**Received:** 17.07.2023

**Received in revised form:** 13.09.2023

**Accepted:** 21.09.2023

**Copyright:** © 2023 The Authors

**ABSTRACT**

**Introduction.** Currently, the development of biodegradable materials is one of the priority areas for the development of science and technology in the field of ecology and environmental protection.

**Purpose.** The purpose of the paper is to study cellulose-containing materials in order to determine the possibility of their usage as packaging materials for food products and disposable tableware.

**Materials and Methods.** In this paper, the objects of the study were a material based on miscanthus and a material based on bleached cellulose. The research was carried out at the Russian Biotechnological University. The authors studied barrier properties, deformation-strength characteristics, sanitary and hygienic indicators, and biodegradability.

**Results.** Miscanthus material has higher physical and mechanical properties compared to cellulose wood material. The permeability to water vapor, oxygen, as well as the grease resistance of all the studied samples is low. Wood pulp and miscanthus materials are non-grease resistant and are not recommended for fatty foods. When studying samples in a liquid vermicompost medium, it was noted that samples from wood cellulose and miscanthus decomposed in the model medium at the 8th week. It was determined that after 6 weeks of composting, samples of the material from miscanthus decomposed completely, while samples of the material from wood cellulose achieved complete biodegradation after 12 weeks. Studies of laboratory samples in accordance with the technical regulations of the Customs Union 005/2011 "On the safety of packaging" have established that the maximum permissible concentrations of released low-molecular substances do not exceed the established norm, and such packaging can be used for contact with food products.

Conclusions. As a result of studies of the quality of cellulose materials, it was determined that the quality of the products is satisfactory: no defects, no damage, no inclusions. It was established that the studied samples have high physical and mechanical properties. It was determined that samples of cellulose materials decompose completely within 3 months. In this case, not even fragments of materials remain. It was found that even under conditions of limited access to air oxygen (landfill model), the samples decompose completely within 4 months without the formation of fragments of products or fibers. Based on the results of the studies, the compliance of samples of cellulose plates with the standards of TR CU 005/2011 was determined. The outcomes of the research reveal that these cellulose-containing materials can be used as packaging materials for food products and disposable tableware.

**KEYWORDS**

miscanthus material, wood cellulose material, biodegradation, barrier properties, deformation-strength characteristics

**To cite:** Kirsh, I. A., Tveritnikova, I. S., & Batalova, V. V. (2023). Feasibility Study of Biodegradable Cellulose-Containing Materials Based on Miscanthus as Disposable Tableware and Food Packaging. *Health, Food & Biotechnology, 5*(2), 28-38. https://doi.org/10.36107/hfb.2023.i2.s171

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время полимерные материалы и изделия из них используются повсеместно, они широко применяются почти во всех сферах деятельности человека, начиная от пищевой отрасли, заканчивая деталями для автомобилестроения. Производство полимеров, синтезируемых из нефти с каждым годом, растет, только в России за 2021 год количество изготавливаемых пластиковых изделий составило 821,1 тыс. т[1]. Однако проблемы с экологией и возобновлением нефтересурсов остаются нерешенными, поэтому важно искать альтернативы производимым пластикам.

Так, для улучшения экологической ситуации в мире, люди начали проявлять большой интерес к производству и применению биополимеров и биоразлагаемых полимерных композиций (БПК). Большинство полимеров, используемых для производства полимерных изделий, являются биоинертными и не разлагаются в естественных условиях в течение длительного времени. К тому же обычные пластики требуют дорогой и сложной утилизации, а также на их изготовление уходит большой запас невозобновляемых ресурсов. Поэтому ученые и инженеры начали разрабатывать технические решения, которые позволили бы, сократить потребление ресурсов за счет применения возобновляемых энергоресурсов, таких как природные полимеры, или ресурсов в виде отходов с производств, которые могут быть заново использованы в других отраслях, например, в пищевой промышленности, занимающей в области упаковки пищевых продуктов сегмент до 85 %[2] (Alizadeh-Sani et al., 2021; Кирш и соавт., 2022; Литвяк, 2019).

Отрасль биоразлагаемых полимерных материалов за последние несколько лет достигла значительных шагов в развитии. В зависимости от типа разложения биодеградируемые полимерные материалы классифицируют на три основные группы (Балыхин и соавт., 2021; Карпунин и соавт., 2015):

1) биоразлагаемые полимеры — природные полимеры (целлюлоза, крахмал, отходы агропромышленного комплекса, свекловичная лузга, натуральный каучук, полигидроксибутират, полибутиролактон, полимолочная кислота и т.д.);
2) полимеры, подверженные биодеструкции (сложные полиэфиры и полиамиды);
3) материалы, которые могут подвергаться биоэрозии — материалы на основе смесей или сополимеров синтетических полимеров с полимерами первой группы (полиэтилен с крахмалом и пр.).

Также выделяют классификацию биодеградируемых полимеров по их происхождению[3] (Балыхин и соавт., 2021):

1) природные полимеры такие как крахмал, целлюлоза, хитозан, декстрин;
2) модифицированные природные полимеры, например, продукты взаимодействия полисахаридов с изоцианатами;
3) синтетические полимеры, полилактоны (поликапролактон, полибутиролактон), полилактиды (полимолочная кислота), кислоты полиаминов и их сополимеры.

На сегодняшний день активно создаются и исследуются полимерные материалы (ПМ), которым придается способность к биоразложению различными путями.

Можно выделить несколько технологий, направленных на придание традиционным ПМ способности к биоразложению (Балыхин и соавт., 2021; Kirsh et al., 2020):

1. Посредством введения в синтетический полимер добавок в виде отходов, производимых агропромышленными производственными комплексами (АПК), например, свекольный жом, овсяная лузга, шелуха гречихи, кукурузная мезга и др.
2. Получение композиционных материалов на основе синтетических и природных биоразлагаемых полимеров (крахмал, целлюлоза, полимолочная кислота и т.д.).
3. Введение в синтетические полимеры оксобиоразлагаемых добавок, содержащих соли переходных металлов, которые создают свободные радикалы, ведущие к появлению гидро- и пероксидов в различных формах, такие продукты способны в дальнейшем подвергаться биоразложению вместе с полимером[4,5] (Литвяк, 2019; Мазитова и соавт., 2021). Данные добавки имеют ограничения и сегодня имеют запрет на применение во многих странах.

---

[1] Poly&Pro сообщество профессионалов. (2022). Производство пластмассовых изделий в России за год выросло на 7,7 %. https://polyprofi.ru/news/proizvodstvo_plastmassovykh_izdeliy_v_rossii_za_god_vyroslo_na_7_7.html

[2] Крутько, Э. Т., Прокопчук, Н. Р., & Глоба, А. И. (2014). *Технология биоразлагаемых полимерных материалов: учеб.-метод. пособие для студентов специальности 1–48 01 02 «Химическая технология органических веществ, материалов и изделий» специализации 1–48 01 02 04 «Технология пластических масс»,* (с. 65–69). БГТУ.

[3] Классификация биоразлагаемых полимерных материалов. (2013). Мастерская своего дела. https://3dbym.ru/2013/11/klassifikaciya-biorazlagaemyx-polimernyx-materialov/

[4] Сироткин, А. С., Лисюкова, Ю. В., Вдовина, Т. В., & Щербакова, Ю. В. (2017). *Биополимеры и перспективные материалы на их основе: учебное пособие,* (с. 86–98). Издательство КНИТУ.

[5] Штильман, М. И. (2020). *Технология полимеров медико-биологического назначения. Полимеры природного происхождения: учебное пособие*, (с. 125–134). Лаборатория знаний.

В настоящее время широко развивается направление по созданию синтетических полимерных композиций с добавлением в них отходов с АПК (например, рисовая лузга, крахмал, гречневая лузга, свекловичные жом и др.), что приводит к появлению новых материалов способных к биоразложению. Примером такого материала может служить смесь полиэтилена высокого давления (ПЭВД) с полиэтиленом низкого давления (ПЭНД), наполненная лузгой семян подсолнечника (Шабарина и соавт., 2021). В результате проведенных исследований авторами статьи было установлено, что при введении лузги семян подсолнечника в полимерные композиции можно добиться улучшения реологических свойств, при незначительном изменении физико-механических свойств, а также достичь биоразлагаемости полимерных композиционных материалов.

Еще одним направлением, применяемым для придания полимерным материалам способности к биодеградации, является получение композиций на основе синтетических полимеров, в матрицу которых вводят биоразлагаемые природные полимеры, способные в определенный период времени подвергнуть разложению основной полимер. К природным полимерам относят целлюлозу, различные крахмалы, хитин, хитозан и другие вещества. Развитие данного направления получения БПК началось с создания материалов, наполненных полимерными углеводами, а именно различными видами крахмалов (Wei, 2016; Lim et al., 2012; Аунг, 2020; Кирш и соавт., 2020; Kirsh et al., 2019; Kirsh et al., 2019). В одной из научной статьей (Ольхов и соавт., 2015) был разработан и исследован композиционный материал на основе полиэтилена и кукурузного крахмала. Авторы данной работы изготовили новую композицию, исследовали ее на различные технологические свойства, предложили способы переработки данного материала, а также на основании экспериментов предположили, что этот полимерный композиционный материал (ПКМ) будет являться биоразлагаемым.

Однако, такие БПК на основе синтетического полимерного материала с добавлением природного компонента разлагаются более 4 лет. Срок разложения биополимеров существенно меньше.

Биополимеры — это класс полимеров, встречающихся в природе в естественном виде и входящие в состав живых организмов[6]. По-другому биополимерами считаются природные полимеры, вырабатываемые клетками живых организмов. Как и синтетические полимеры они строятся из одинаковых или схожих мономерных звеньев. Поэтому биополимеры в зависимости от состава делят на регулярные и нерегулярные соединения.

Биополимеры на данный момент имеют широкое применение во многих областях деятельности человека, включая биомедицинскую инженерию, упаковочное производство, пищевую промышленность и сельхозпроизводство. В упаковочной отрасли при производстве упаковочных материалов наибольшее распространение имеет класс полисахаридов, яркими представителями которого являются крахмал, целлюлоза и хитозан[7,8,9] (Ilyas et al., 2018).

Целлюлоза — это органическое соединение, природный полисахарид, являющийся частью и структурным компонентом клеточных стенок растений. Основными известными источниками целлюлозы служат деревья хвойных и лиственных пород, а также хлопчатник. В растениях протекают сложные биохимические реакции, которые начинаются с фотосинтеза моносахаридов, в результате чего происходит образование целлюлозы[10] (Virendra et al., 1981). Физико-химические, физические и химические свойства целлюлозы зависят от ее химического строения и физической структуры. Целлюлоза по физическому состоянию[11] представляет собой бесцветный волокнистый материал, плотность которого находится в диапазоне от 1,52 до 1,54 г/см$^3$. Достоинствами целлюлозного волокна по сравнению с синтетическими волокнами являются большая гигроскопичность, более высокая термостойкость, более низкая стоимость и лучшие гигиенические свойства; недостатками являются горючесть, невысокая эластичность, малая устойчивость к действию микроорганизмов (Ершова & Чупрова, 2016).

Целлюлоза привлекла к себе значительное внимание как наиболее сильное потенциальное сырье для произ-

[6] Сироткин, А. С., Лисюкова, Ю. В., Вдовина, Т. В., & Щербакова, Ю. В. (2017). *Биополимеры и перспективные материалы на их основе: учебное пособие*, (с. 86–98). Издательство КНИТУ.

[7] Штильман, М. И. (2020). *Технология полимеров медико-биологического назначения. Полимеры природного происхождения: учебное пособие*, (с. 125–134). Лаборатория знаний.

[8] Смирнова, А. И., & Антонова, В. С. (2020). *Прикладная химия природных соединений: учеб. Пособие*, (с. 65–71). ВШТЭ СПбГУПТД.

[9] Крутько, Э. Т., Прокопчук, Н. Р., & Глоба, А. И. (2014). *Технология биоразлагаемых полимерных материалов: учеб.-метод. пособие для студентов специальности 1–48 01 02 «Химическая технология органических веществ, материалов и изделий» специализации* 1–48 01 0*2 04 «Технология пластических масс», (с. 65–69). БГТУ.*

[10] Терентьева, Э. П., Удовенко, Н. К., & Павлова, Е. А. (2014). *Химия древесины, целлюлозы и синтетических полимеров: учебное пособие,* (с. 37–42). СПбГТУРП. Ч. 1.

[11] Соколова, Н. А., Кочетков, В. Г., Новопольцева, О. М., & Каблов, В. Ф. (2018). Химия биополимеров: учебно-методическое пособие, (с. 23–27). ВолгГТУ.

водства полимерных материалов на биологической основе. За последнее десятилетие достигнут значительный прогресс в производстве биополимеров на основе различных форм целлюлозы. Использование волокон целлюлозы, наноцеллюлозы и производных целлюлозы в качестве наполнителей или матриц в биокомпозитных материалах является эффективной биоустойчивой альтернативой для производства высококачественных полимерных композитов и функциональных полимерных материалов. Использование мономеров, полученных из целлюлозы (глюкоза и другие химические вещества платформы) в синтезе устойчивых биополимеров и функциональных полимерных материалов не только обеспечивает жизнеспособную замену большинству полимеров на нефтяной основе, но также позволяет разрабатывать новые полимеры и функциональные полимерные материалы (Shaghaleh et al., 2018).

В настоящее время активно ведется поиск биоразлагаемых материалов с ускоренным сроков разложения в окружающей среде. Такие материалы целесообразно использовать для одноразовой посуды, упаковки продуктов с коротким сроком реализации. Биоразлагаемые материалы должны соответствовать требованиям, предъявляемым к упаковке пищевых продуктов согласно ТР ТС 005/2011 «О безопасности упаковки», а также по уровню физико-механических, барьерных характеристик для реализации процесса упаковывания пищевых продуктов и одноразовой посуды.

Сегодня на рынке не представлены упаковочные материалы и одноразовая посуда со сроком разложения менее 5 месяцев. В основном, присутствуют изделия из полимерных композиций на основе биополимеров, картонные упаковки с покрытием, которые имеют срок разложения более 5 месяцев, а также макулатурные картоны, которые имеют ограничения по использованию для прямого доступа к пищевому продукту, готовому к употреблению[12,13,14]. Одноразовая посуда представлена из полимерных композитов, которая имеет маркировку «биоразлагаемая», в основном, только как элемент маркетинга и гринвошинга[15,16].

В связи с этим, исследование целлюлозосодержащих композиций и изделий с целью определения возможности их использования в качестве упаковочных материалов пищевых продуктов и одноразовой посуды является актуальным и перспективным. Целью работы является исследование целлюлозосодержащих материалов и изделий для определения возможности их использования в качестве упаковочных материалов пищевых продуктов и одноразовой посуды.

В работе были поставлены следующие задачи:
(1) исследовать физико-механические свойства целлюлозосодержащих материалов и изделий из них;
(2) провести исследования барьерных и санитарно-химических свойств целлюлозосодержащих материалов и изделий;
(3) установить сроки разложения целлюлозосодержащих материалов и изделий из них;
(4) определить перспективу использования исследуемых материалов для упаковки пищевых продуктов и одноразовой посуды.

# МЕТОДЫ

## Материалы исследования

В качестве объектов исследования были выбраны такие материалы, как:
1) материал на основе из мискантуса (в виде тарелок и подложек, листов), внешний вид представлен на Рисунке 1 (*а*);
2) в качестве контрольного образца были использован материал на основе беленой целлюлозы (далее материал из древесной целлюлозы), внешний вид представлен на Рисунке 1 (*б*).

Все образцы изделий предоставлены ООО «НПО «Биотехкомпозит-Дулево».

Работа выполнялась в ЦКП «Перспективные упаковочные решения и технологии рециклинга» в ФГБОУ ВО «Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ)».

[12] ТампоМеханика. (2023). *Биополимеры для одноразовой посуды*. https://www.bio.tampomechanika.ru/biorazlagaemaya-odnorazovaya-posuda/

[13] EKOFRIEND. (2023). *Экопосуда: опыт других стран и 10 альтернатив одноразовому пластику*. https://ekofriend.com/articles/ekoposuda/ekoposuda-opyt-drugih-stran-i-10-alternativ-odnorazovomu-plastiku

[14] B-MAG деловая жизнь сегодня. (2023). *4 шага для производства биоразлагаемой одноразовой посуды*. https://b-mag.ru/4-shaga-dlja-proizvodstva-biorazlagaemoj-odnorazovoj-posudy/

[15] РБК. (2020). *Биопластик — новейшая форма гринвошинга: исследование «Гринпис»*. https://trends.rbc.ru/trends/green/5db996019a794769ca92d0d2

[16] Зеленый. (2021). *Что такое гринвошинг: как отличить настоящую экопродукцию от «зелёного» пиара.* https://green.reo.ru/articles/tpost/to1nakk2d1-chto-takoe-grinvoshing-kak-otlichit-nast

**Рисунок 1**

*Внешний вид целлюлозосодержащих материалов (а — материал из мискантуса; б — материал из древесной целлюлозы)*

## Методы исследования

В работе использовались следующие методы испытания:

- определение физико-механических свойств материалов проводили в соответствии с ГОСТ 20683–97 «Картон тарный. Сопротивление торцевому сжатию», ГОСТ 9895–2013 «Определение сопротивлению сжатия. Метод испытания на коротком расстоянии», ГОСТ 304360–96 «Бумага и картон. Определение прочности при растяжении» на универсальной разрывной машине ИТС 8111, ГОСТ 14236–81 «Пластмассы. Метод испытания полимерных пленок на растяжение» на следующих приборах: разрывная машина РМ-50 — при скорости растяжения 100 мм/мин;
- определение газопроницаемости по кислороду полимерных материалов проводили в соответствии с ASTMD1434–82(2003), ГОСТ 23553 на газовом хроматографе Кристалл 5000 и на приборе Perme OX2/231 V1.0 (Labthink) при температуре 23±2 °С;
- определение жиростойкости исследуемых образцов (ГОСТ 16532–2-2016 «Бумага и картон. Определение жиростойкости. Часть 2. Определение отталкивающей способности поверхности»). Суть метода состоит в определении степени проникновения жиров через испытуемый материал за отведенный период времени. Результатом испытания устанавливалась стойкость образцов к растворам жиров;
- исследование миграции низкомолекулярных веществ проводили на газовом хроматографе «Кристаллюкс 4000М» с капиллярными колонками ZB-WAX 60 × 0,53 × 1,0 и ZB-624 60 × 0,53 × 3,0, использовался метод контроля 4.1.3166–2014;
- изменение массы образца при контакте с водой проводили по ГОСТ- 12605–97 «Бумага и картон. Метод определения поверхностной впитываемости воды при одностороннем смачивании (метод Кобба)»;
- метод определения стойкости к действию химических сред ГОСТ Р 54530–2011 «Ресурсосбережение. Упаковка. Требования, критерии и схема утилизации упаковки посредством компостирования и биологического разложения». Метод состоит в определении изменений характеристик материала, таких как внешний вид, масса и размеры под действием жидких химических сред. Образцы помещались в раствор биогумуса на 8 недель. Их взвешивание и оценивание внешнего вида производилось один раз в неделю;
- метод компостирования на определение биодеградации полимерной композиции (Британский стандарт BSEN 13432:2000 «Упаковка. Требования к использованию упаковки посредством компостирования и биологического разложения»). Сущность метода заключается в определении способности испытательных образцов к биодеградации под действием микробиальной почвы при определенной температуре и влажности. При проведении данного метода применялась земля, активированная биогумусом в соответствии с ТУ 0391–11158096-2002 и влажностью 60 %. Компостирование исследуемых материалов проводилось в течение 3 месяцев (до полного разложения). Способность к биоразложению образцов оценивали по происходящим внешним изменениям характеристик.

## Анализ данных

Статистическую обработку результатов проводили с использованием программы IBM SPSS Statistics Ver. 20 (SPSS Inc. США). Погрешность числовых значений не превышает 6 %. Повторности экспериментов составили 10 исследуемых образцов на одну точку.

# РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На сегодняшний день на сегменте рынка упаковочной отрасли не представлены упаковки и одноразовая посуда, которая бы биодеградировала в окружающей среде менее 5 месяцев. Большинство на сегодняшний день представлены изделиями из полимерных композиционных материалов на основе упаковки из картона с покрытием, а также биопластика, которые разлагаются более 5 месяцев. Кроме того, существует макулатурная картонная упаковка, которая имеет ограничения для прямого использования к продуктам питания готовыми к употреблению. Сегодня одноразовая посуда чаще всего производится из полимерных материалов, при этом она имеет маркировку «биоразлагаемая (или компостируемая)», в основном, только как элемент маркетинга и гринвошинга.

В результате проведенного литературного обзора, было установлено, что наиболее перспективное направление связано с разработкой материалов со сроком компостирования до 5 месяцев, поэтому были проведены исследования образцов из растительной биомассы на основе мискантуса. Ранее не было проведено исследований материалов из мискантуса на такие показатели, как определение барьерных и санитарно-гигиенических свойств, биодеградации материала.

Мискантус относится к роду многолетних травянистых растений семейства злаковых. Он относится к нетрадиционным возобновляемым источником сырья и энергии, получение которых не требует значительных капитальных вложений. Мискантус неприхотлив, устойчив к засухе, морозостоек, дает большой урожай 10–30 т/га в год, способен произрастать на одном месте более 20 лет без существенного снижения продуктивности. Одним из достоинств данной культуры является, что она может произрастать длительное время на низкопродуктивных землях, что обеспечивает более высокую экономическую отдачу использования таких угодий (Капустянчик & Якименко, 2020; Будаева и соавт., 2011; Косточко и соавт., 2010; Gismatulinaa et al., 2015; Tu et al., 2020).

## Определение физико-механических свойств

На первом этапе работы были проведены исследования физико-механических свойств образцов, результаты представлены в Таблице 1.

В результате установлено, что исследуемые образцы имеют высокие показатели физико-механических свойств. Определено, что материал из мискантуса имеет более высокие показатели физико-механических свойств по сравнению с целлюлозосодержащим материалом из древесины.

**Таблица 1**

*Физико-механические свойства целлюлозосодержащих материалов*

| Показатель физико-механических свойств, ГОСТ | Наименование образца, толщина | |
|---|---|---|
| | Материал из древесной целлюлозы, 535 мкм | Материалы из мискантуса, 690 мкм |
| Разрушающее напряжение, МПа, ГОСТ 14236–81 | 9,52 ± 1,5 | 9,59 ± 1,5 |
| Относительное удлинение при разрыве, %, ГОСТ 14236–81 | 5,87 ± 0,5 | 4,56 ± 0,5 |
| Прочность при растяжении, кН/м, ГОСТ 304360 | Более 4,4 ± 0,5 (появление ломкости, разрушения нет) | Более 5,5 ± 0,5 (появление ломкости, разрушения нет) |
| Сопротивление торцевому сжатию, кН/м, ГОСТ 20683 | 0,38 ± 0,02 | 0,56 ± 0,02 |
| Сопротивление сжатию, кН/м, ГОСТ 9895 | 3,23 ± 0,5 | 5,36 ± 0,5 |

## Исследование на качественные характеристики материалов

Далее определяли качественные характеристики целлюлозосодержащих материалов. Результаты представлены в Таблице 2. На основании проведенных исследований образцов на основе из целлюлозосодержащих материалов было определено, что изделия имеют удовлетворительное качество: дефектов нет, повреждений нет, включений нет. Определена плотность материалов: данный показатель имеет большее значение для образцов материала из мискантуса, при этом значение водопоглощения у них ниже.

## Исследования санитарно-химических показателей

Далее проводили оценку санитарно-гигиенических свойств, исследуемых образцов согласно ТР ТС 005/2011. Образцы целлюлозных материалов помещались в модельную среду (дистиллированная вода) на 3, 7 и 21 сутки для получения вытяжек. Оценка водных вытяжек органолептическим методом на протяжении всего периода испытания показала, что образцы не выделяют посторонних запахов. Водная вытяжка не имеет запаха, не меняет цвет и прозрачность на всем протяжении эксперимента, что является основанием для разрешения данных материалов для контакта с пищевыми продуктами.

Кроме того, полученные вытяжки исследовали на газовом хроматографе «Кристаллюкс 4000М» с капиллярными

**Таблица 2**

*Характеристики качества исследуемых целлюлозосодержащих материалов*

| Показатель качества | Наименование образца, толщина | |
|---|---|---|
| | Материал из древесной целлюлозы, 535 мкм | Материал из мискантуса, 690 мкм |
| Внешний вид | Дефектов нет, повреждений нет | Дефектов нет, повреждений нет |
| Наличие посторонних включений | Не обнаружено | Не обнаружено |
| Плотность, г/м$^2$ | 324 ± 2 | 342 ± 2 |
| Влажность, % | 3,81 ± 0,2 | 4,37 ± 0,2 |
| Водопоглощение, г/м$^2$ | 203 ± 2 | 161 ± 2 |

колонками ZB-WAX 60 × 0,53 × 1,0 и ZB-624 60 × 0,53 × 3,0, использовался метод контроля 4.1.3166–2014». Газохроматографическое определение гексана, гептана, ацетальдегида, ацетона, метилацетата, этилацетата, метанола, изопропанола, акрилонитрила, н-пропанола, н-пропилацетата, бутилацетата, изобутанола, н-бутанола, бензола, толуола, этилбензола, м-, о- и п-ксилолов, изопропилбензола, стирола, -метилстирола в воде и водных вытяжках из материалов. По результатам испытания определено соответствие образцов нормам согласно ТР ТС 005/2011.

## Исследования на барьерные свойства материалов

Далее проводили оценку барьерных свойств исследуемых образцов. В результате установлено, что проницаемость для паров воды, по кислороду, а также жиростойкость всех исследуемых образцов невысокая, что показано в Таблице 3.

Наиболее значимые характеристики для упаковочных материалов являются барьерные свойства, которые включают в себя такие показатели, как жиро-, паро- и газопроницаемость. Следует отметить тот факт, что паропроницаемость и кислородопроницаемость материалов из мискантуса ниже примерно в 1,5–2 раза, чем у образцов из древесной целлюлозы. Таким образом, материал на основе древесной целлюлозы, а также материал из мискантуса являются нежиростойкими, и не рекомендуются для пищевых продуктов с высоким содержанием жира.

## Определение биодеградации материалов

На следующем этапе проводили исследования на биоразложение целлюлозосодержащих материалов.

При исследовании образцов в жидкой среде биогумус было отмечено, что образцы из древесной целлюлозы и из мискантуса разложились в модельной среде на 8 неделе.

Методом компостирования было установлено, что за первые 7 дней материалы на основе мискантуса теряют 42 % массы, а на основе древесной целлюлозы — 34 %. За 14 дней измерить массу образцов практически не представляется возможным, поскольку обнаруживаются лишь отдельные фрагменты и на поверхности почвы, а также наблюдается развитие микроорганизмов. На Рисунке 2 представлен график динамики биоразложения по процентному изменению массы.

Определено, что за 6 недель компостирования образцы материалов из мискантуса разлагаются полностью, при этом не остается даже фрагментов образцов. В свою очередь образцы материалов из древесной целлюлозы

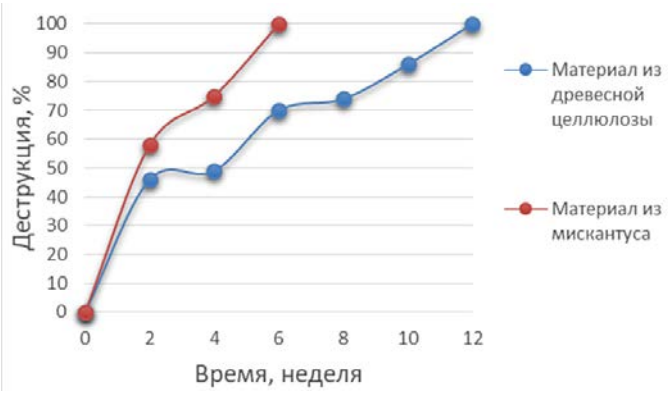
**Таблица 3**

*Барьерные свойства исследуемых образцов*

| Показатель барьерных свойств, ед. измерения | Наименование образца, толщина | |
|---|---|---|
| | Материал из древесной целлюлозы, 535 мкм | Материал из мискантуса, 690 мкм |
| Паропроницаемость, г/см$^2$ за 24 часа при 23 °С | 0,025 × 0,001 | 0,014 × 0,001 |
| Паропроницаемость, г/см$^2$ за 24 часа при 38 °С | 0,53 × 0,02 | 0,36 × 0,02 |
| Проницаемость по кислороду, мл/м$^2$ при 23 °С | 583,9 × 2 | 448,7 × 2 |
| Жиростойкость (модельная среда — рафинированное растительное масло, подкрашенное пищевым красителем «Судан», плотность 917 кг/м$^3$ (при 20 °С), динамическая вязкость 919 МПа×с (при 20 °С), наносили по 1 капле — 0,3–0,5 мл. | Моментальное впитывание поверхностью модельной среды | Моментальное впитывание поверхностью модельной среды |

**Рисунок 2**

*График динамики биоразложения по процентному изменению массы*




достигли полного биоразложения после 12 недели. Установлено, что даже в условиях ограничения доступа кислорода воздуха (модель полигон) образцы разлагаются полностью в течение 4 месяцев без образования фрагментов изделий или волокон.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенных исследований качества целлюлозосодержащих материалов определено, что качество изделий удовлетворительное. Плотность материалов из мискантуса несколько выше, чем у материалов на основе древесной целлюлозы. Установлено, что исследуемые образцы имеют высокие показатели деформационно-прочностных характеристик. Определено, что материал на основе мискантуса имеют более высокие физико-механические свойства по сравнению с образцами материалов из древесной целлюлозы.

По результатам проведенных исследований определено соответствие образцов целлюлозосодержащих материалов нормам ТР ТС 005/2011. Установлено, что паропроницаемость и проницаемость по кислороду материалов из мискантуса ниже примерно в 1,5–2 раза, чем у образцов из древесной целлюлозы. Так же выявлено, что образцы целлюлозосодержащих материалов разлагаются полностью в течение 3 месяцев, при этом не остается даже фрагментов материалов, а материал из мискантуса разлагается быстрее за 6 недель. Более того, установлено, что при разложении на полигоне (без доступа кислорода) исследуемые образцы разлагаются полностью за 4 месяца без образования фрагментов изделий или волокон.

В результате проведенных исследований, данные целлюлозосодержащие материалы можно использовать в качестве упаковочных материалов пищевых продуктов и одноразовой посуды.

## ВКЛАД АВТОРОВ

**Кирш И. А.:** Концептуализация, разработка методологии исследования, руководство исследованием

**Тверитникова И. С.:** Курирование данных, верификация данных, написание-рецензирование и редактирование рукописи

**Баталова В.В.:** Проведение исследования, создание черновика рукописи

## ЛИТЕРАТУРА

Аунг, Х. Т. (2020). *Получение композиционных материалов на основе продуктов переработки рисовой шелухи* [Кандидатская диссертация, РХТУ]. Москва, Россия.

Балыхин, М. Г., Кирш, И. А., Губанова, М. И., Банникова, О. А., Безнаева, О. В., Чалых, А. Е., Щербина, А. А., Иорданский, А. Л., Ольхов, А. А., Щетинин, М. П., & Музыка, М. Ю. (2021). *Рециклинг упаковки и биоразлагаемые полимерные материалы: монография*, (с.120–190). Проспект.

Будаева, В. В., Митрофанов, Р. Ю., Золотухин, В. Н., & Сакович, Г. В. (2011). Новые сырьевые источники целлюлозы для технической химии. *Вестник казанского технологического университета*, (7), 205–212.

Ершова, О. В., & Чупрова, Л. В. (2016). Способы химической модификации целлюлозы с целью создания новых композиционных материалов. *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований,* (10), 359–362.

Капустянчик, С. Ю., & Якименко, В. Н. (2020). Мискантус — перспективная сырьевая, энергетическая и фитомелиоративная культура (литературный обзор). *Почвы и окружающая среда, 3*(3), 10–24. https://doi.org/10.31251/pos.v3i3.126

Карпунин, И. И., Кузьмич, В. В., & Балабанова, Т. Ф. (2015). Классификация биологически разлагаемых полимеров. *Наука и техника*, (5), 53–59.

Кирш, И. А., Овсянников, С. А., Безнаева О. В., Банникова, О. А., Губанова, М. И., Новиков, М. Н., Тверитникова, И. С. (2022). Перспективы повторной переработки отходов одноразовой упаковки. *Health, Food & Biotechnology*, *4*(2), 31–47. https://doi.org/10.36107/hfb.2022.i2.s149

Кирш, И. А., Романова, В. А., Тверитникова, И. С., Безнаева, О. В., Банникова, О. А., & Шмакова Н. С. (2020). Исследования влияния ультразвуковой обработки на расплавы полимерных композиций на основе полиэтилена и модифицированного крахмала. *Химическая промышленность сегодня*, (1), 62–67.

Косточко, А. В., Шипина, О. Т., Валишина, З. Т., Гараева, М. Р., & Александров, А. А. (2010). Получение и исследование свойств целлюлозы из травянистых растений. *Вестник Казанского технологического университета*, (9), 267–275.

Литвяк, В. В. (2019). Перспективы производства современных упаковочных материалов с применением биоразлагаемых полимерных композиций. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*, (2), 84–94.

Мазитова, А. К., Аминова, Г. К., Зарипов, И. И., & Вихарева, И. Н. (2021). Биоразлагаемые полимерные материалы и модифицирующие добавки: современное состояние. Часть II. Нанотехнологии в строительстве, 13, 32–38. https://doi.org/10.15828/2075–8545-2021–13-1–32-38

Ольхов, А. А., Попов, А. А., Ольхов, А. А., Григорьева, Е. А., Хватов, А. В., & Абзальдинов, Х. С. (2015). Технологические свойства биоразлагаемых композиционных материалов на основе полиэтилена и крахмала. *Вестник Казанского технологического университета*, *16*, 105–109.

Шабарина, А. А., Кузьмин, А. М., Водяков, В. Н., & Шабарин, И. А. (2021). Получение биоразлагаемых композиционных материалов на основе полиолефинов и лузги из семян подсолнечника. Известия высших учебных заведений. *Химия и химическая технология*, (4), 73–76. https://doi.org/10.6060/ivkkt.20216404.6283

Alizadeh-Sani, M., Azizi-Lalabadi, M., Tavassoli, M., Mohammadian, E., & McClements, D.J. (2021). Recent Advances in the Development of Smart and Active Biodegradable Packaging Materials. *Nanomaterials,11*(5), 1331.https://doi.org/10.3390/nano11051331

Gismatulinaa, Yu. A., Budaevaa, V. V., Veprevb, S. G., Sakovicha, G. V., & Shumnyb, V. K. (2015). Cellulose from Various Parts of Soranovskii Miscanthus. *Russian Journal of Genetics: Applied Research, 1*(5), 60–68. https://doi.org/10.1134/S2079059715010049

Ilyas, R., Sapuan, S., Ishak, M., & Zainudin, E. (2018). Sugar palm nanocrystalline cellulose reinforced sugar palm starch composite: Degradation and water-barrier properties. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 368,* 012006. https://doi.org/10.1088/1757–899X/368/1/012006

Kirsh, I. A., Beznaeva, O. V., Bannikova, O. A., Romanova, V. A., & Barulya, I. V. (2019). Biodegradable polymer compositions based on the waste of the agro-industrial complex. *Bioscience Biotechnology Research Communications, S5*(12), 196–202.

Kirsh, I. A., Beznaeva, O. V., Bannikova, O. A., Romanova, V. A., & Barulya, I. V. (2019). Development of biodegradable polymer compositions based on the waste of the agro-industrial complex. *International Journal of Advanced Biotechnology and Research, 2*(10), 15–23.

Kirsh, I., Bannikova, O., Beznaeva, O., Tveritnikova, I., Romanova, V., Zagrebina, D., Frolova, Y., & Myalenko, D. (2020). Research of the influence of the ultrasonic treatment on the melts of the polymeric compositions for the creation of packaging materials with antimicrobial properties and biodegrability. *Polymers, 2*(12), 275. https://doi.org/10.3390/polym12020275

Lim, J. S., Mana, Z. A, Alwi, S. R. W, & Hashim, H. (2012). A review on utilization of biomass from rice industry as a source of renewable energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16,* 3084–3094. https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.051

Shaghaleh, H., Xu, X., & Wang, S. (2018). Current progress in production of biopolymeric materials based on cellulose, cellulose nanofibers, and cellulose derivatives. *The Royal Society of Chemistry, 8,* 825–842. https://doi.org/10.1039/C7RA11157F

Tu, W.-C., Weigand, L., Hummel, M., Sixta, H., Brandt-Talbot, A., & Hallett, J. P. (2020). Characterisation of cellulose pulps isolated from Miscanthus using a low-cost acidic ionic liquid. *Cellulose, 27,* 4745–4761. https://link.springer.com/article/10.1007/s10570–020-03073–1

Virendra, S. B., & Tarun, K. G. (1981). Biodegradation of cellulosic materials: Substrates, microorganisms, enzymes and products. *Enzyme and Microbial Technology, 2*(3), 94–104 https://doi.org/10.1016/0141–0229(81)90066–1

Wei, Z. (2016). Comprehensive Applications of Rice Husk Biomass Master's. *Theses,* 1033.

## REFERENCES

Aung, H. T. (2020). *Obtaining composite materials based on rice husk processing products* [Candidate Dissertation, RCTU]. Moscow, Russia.

Balykhin, M. G., Kirsh, I. A., Gubanova, M. I., Bannikova, O. A., Beznaeva, O. V., Chalykh, A. E., Shcherbina, A. A., Iordansky, A. L., Olkhov, A. A., Shchetinin, M. P., & Muzyka, M. Yu. (2021). *Recikling upakovki i biorazlagaemye polimernye materialy: monografiya* (p. 120–190). Prospect.

Budaeva, V. V., Mitrofanov, R. Yu., Zolotukhin, V. N., & Sakovich, G. V. (2011). New raw materials of cellulose for technical

chemistry. *Vestnik kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, (7), 205–212.

Ershova, O. V., & Chuprova, L. V. (2016). Methods for the chemical modification of cellulose in order to create new composite materials. *Mezhdunarodnyj zhurnal prikladnyh i fundamental'nyh issledovanij*, (10), 359–362.

Kapustianchik, S. Yu., & Yakimenko, V. N. (2020). Miscanthus is a promising raw material, energy and phytomeliorative crop (literature review). *Pochvy i okruzhayushchaya sreda, 3*(3), 10–24. https://doi.org/10.31251/pos.v3i3.126

Karpunin, I. I., Kuzmich, V. V., &Balabanova, T. F. (2015). Classification of biodegradable polymers. *Nauka i tekhnika,* (5), 53–59.

Kirsh, I. A., Ovsyannikov, S. A., Beznaeva, O. V., Bannikova, O. A., Gubanova, M. I., Novikov, M. N., & Tveritnikova, I. S. (2022). Prospects for the Recycling of Disposable Packaging Waste. *Health, Food & Biotechnology, 4*(2), 31–47. https://doi.org/10.36107/hfb.2022.i2.s149

Kirsh, I. A., Romanova, V. A., Tveritnikova, I. S., Beznaeva, O. V., Bannikova, O. A., & Shmakova N. S. (2020). Studies of the effect of ultrasonic treatment on melts of polymer compositions based on polyethylene and modified starch. *Himicheskaya promyshlennost' segodnya,* (1), 62–67.

Kostochko, A. V., Shipina, O. T., Valishina, Z. T., Garaeva, M. R., & Alexandrov, A. A. (2010). Preparation and study of the properties of cellulose from herbaceous plants. *Vestnik kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, (9), 267–275.

Litvyak, V. V. (2019). Prospects for the production of modern packaging materials using biodegradable polymer compositions. *ZHurnal Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Ekologiya,* (2), 84–94.

Mazitova, A. K., Aminova, G. K., Zaripov, I. I., & Vikhareva, I. N. (2021). Biodegradable polymeric materials and modifying additives: state of the art. Part II. *Nanotekhnologii v stroitel'stve, 13,* 32–38. https://doi.org/10.15828/2075–8545-2021–13-1–32-38

Olkhov, A. A., Popov, A. A., Olkhov, A. A., Grigorieva, E. A., Khvatov, A. V., & Abzaldinov, H. S. (2015). Technological properties of biodegradable composite materials based on polyethylene and starch. *Vestnik kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, *16,* 105–109.

Shabarina, A. A., Kuzmin, A. M., Vodyakov, V. N., & Shabarin, I. A. (2021). Obtaining biodegradable composite materials based on polyolefins and husks from sunflower seeds. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Himiya i himicheskaya tekhnologiya*, (4), 73–76. https://doi.org/10.6060/ivkkt.20216404.6283

Alizadeh-Sani, M., Azizi-Lalabadi, M., Tavassoli, M., Mohammadian, E., & McClements, D.J. (2021). Recent Advances in the Development of Smart and Active Biodegradable Packaging Materials. *Nanomaterials,11*(5), 1331.https://doi.org/10.3390/nano11051331

Gismatulinaa, Yu. A., Budaevaa, V. V., Veprevb, S. G., Sakovicha, G. V., & Shumnyb, V. K. (2015). Cellulose from Various Parts of Soranovskii Miscanthus. *Russian Journal of Genetics: Applied Research, 1*(5), 60–68. https://doi.org/10.1134/S2079059715010049

Ilyas, R., Sapuan, S., Ishak, M., & Zainudin, E. (2018). Sugar palm nanocrystalline cellulose reinforced sugar palm starch composite: Degradation and water-barrier properties. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 368,* 012006. https://doi.org/10.1088/1757–899X/368/1/012006

Kirsh, I. A., Beznaeva, O. V., Bannikova, O. A., Romanova, V. A., & Barulya, I. V. (2019). Biodegradable polymer compositions based on the waste of the agro-industrial complex. *Bioscience Biotechnology Research Communications, S5*(12), 196–202.

Kirsh, I. A., Beznaeva, O. V., Bannikova, O. A., Romanova, V. A., & Barulya, I. V. (2019). Development of biodegradable polymer compositions based on the waste of the agro-industrial complex. *International Journal of Advanced Biotechnology and Research, 2*(10), 15–23.

Kirsh, I., Bannikova, O., Beznaeva, O., Tveritnikova, I., Romanova, V., Zagrebina, D., Frolova, Y., & Myalenko, D. (2020). Research of the influence of the ultrasonic treatment on the melts of the polymeric compositions for the creation of packaging materials with antimicrobial properties and biodegrability. *Polymers, 2*(12), 275. https://doi.org/10.3390/polym12020275

Lim, J. S., Mana, Z. A, Alwi, S. R. W, & Hashim, H. (2012). A review on utilization of biomass from rice industry as a source of renewable energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16,* 3084–3094. https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.051

Shaghaleh, H., Xu, X., & Wang, S. (2018). Current progress in production of biopolymeric materials based on cellulose, cellulose nanofibers, and cellulose derivatives. *The Royal Society of Chemistry, 8,* 825–842. https://doi.org/10.1039/C7RA11157F

Tu, W.-C., Weigand, L., Hummel, M., Sixta, H., Brandt-Talbot, A., & Hallett, J. P. (2020). Characterisation of cellulose pulps isolated from Miscanthus using a low-cost acidic ionic liquid. *Cellulose, 27,* 4745–4761. https://link.springer.com/article/10.1007/s10570–020-03073–1

Virendra, S. B., & Tarun, K. G. (1981). Biodegradation of cellulosic materials: Substrates, microorganisms, enzymes and products. *Enzyme and Microbial Technology, 2*(3), 94–104 https://doi.org/10.1016/0141–0229(81)90066–1

Wei, Z. (2016). Comprehensive Applications of Rice Husk Biomass Master's. *Theses,* 1033.