

<https://doi.org/10.36107/hfb.2024.i2.s211>

Разработка биоразлагаемых активных материалов на основе полилактида, бактериальной наноцеллюлозы и растительных экстрактов

П.В. Шабанова, А.В. Абаева

Самарский государственный
технический университет, Самара,
Россия

Корреспонденция:

Шабанова Полина Васильевна,
Самарский государственный
технический университет,
443010, Россия, Самара,
ул. Галактионовская, д. 141
E-mail: shabanovapv@mail.ru

Конфликт интересов:

авторы сообщают об отсутствии
конфликта интересов.

Поступила: 24.04.2024

Поступила после
рецензирования: 11.08.2024

Принята: 16.08.2024

Copyright: © 2024 Авторы

АННОТАЦИЯ

Введение. Одной из перспективных областей, где могут быть применены пищевые отходы, является производство активной упаковки для пищевых продуктов. На научных форумах происходит активный поиск модернизации известных биоматериалов с помощью полученных активных компонентов из вторичного сырья с высокой антиокислительной способностью.

Цель. Разработка активной упаковочной пленки из биополимера с введением в неё растительного антиокислительного агента в композите с бактериальной наноцеллюлозой, определение физико-химических, антиокислительных свойств полученного биополимерного материала.

Материалы и методы. Объектами исследования являлись: растительный экстракт, получаемый из пищевых отходов (шелуха луковицы) чеснока *Allium sativum*, выращенного на территории Самарской области и собранного в период начала по конец сентября 2023 года; растительный экстракт, получаемый из жмыха бархатцев *Tagetes erecta*, выращенных на территории Самарской области и собранных в период начала по конец сентября 2023 года; растительный экстракт, получаемый из жмыха ягод барбариса *Berberis vulgaris*; растительный экстракт, получаемый из зеленого чая *Camellia sinensis*, собранного в провинции Фуцзянь; растительный экстракт, получаемый из семян горчицы *Sinapis alba*; бактериальная наноцеллюлоза, предоставленная ИПХЭТ СО РАН, гранулы PLA торговой марки Bestfilament, ИП Берчук Д.Ю, Россия. В качестве пластификатора были выбраны: полисорбат ТВИН-80, глицерин.

Результаты. Результаты исследования показывают, что введение бактериальной наноцеллюлозы в исследуемые объекты увеличивает срок действия антиоксидантов. Установлено, что паропроницаемость образцов с глицеринов выше по сравнению с образцами с добавлением Твин-80. Значения степени набухаемости варьируются в зависимости от введенного активного компонента.

Выводы. Полученные данные можно применить в производстве упаковочных материалов для пищевой промышленности.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

бактериальная наноцеллюлоза, полилактид, растительный экстракт, антиоксидантная активность.



Для цитирования: Шабанова, П. В., & Абаева, А. В. (2024). Разработка биоразлагаемых активных материалов на основе полилактида, бактериальной наноцеллюлозы и растительных экстрактов. *Health, Food & Biotechnology*, 6(2), 58–67. <https://doi.org/10.36107/hfb.2024.i2.s211>

<https://doi.org/10.36107/hfb.2024.i2.s211>

Development of Biodegradable Active Materials Based on Polylactide, Nanobacterial Cellulose and Plant Extracts

Polina V. Shabanova, Anna V. Abaeva

Samara State Technical University, Samara, Russia

Correspondence:

Polina V. Shabanova,
Samara State Technical University,
141, Galaktionovskaya st.,
Samara, 443010, Russia
E-mail: shabanovapv@mail.ru

Declaration of competing interest:
none declared.

Received: 24.04.2024

Received in revised form: 11.08.2024

Accepted: 16.08.2024

Copyright: © 2024 The Authors

ABSTRACT

Introduction. One of the promising areas where food waste can be applied is the production of active food packaging. At scientific forums, there is an active search for the modernization of known biomaterials using the obtained active components from secondary raw materials with high antioxidant capacity.

Purpose. Development of an active packaging film made of a biopolymer with the introduction of a plant antioxidant agent in a composite with bacterial nanocellulose, determination of the physico-chemical, antioxidant properties of the resulting biopolymer material.

Materials and Methods. The objects of the study were: a plant extract obtained from food waste (husk) of garlic *Allium sativum* grown in the Samara region and collected from the beginning to the end of September 2023; a plant extract obtained from the cake of marigolds *Tagetes erecta* grown in the Samara region and collected from the beginning to the end of September 2023; vegetable extract obtained from the cake of barberry berries *Berberis vulgaris*; vegetable extract obtained from *Camellia sinensis* green tea collected in Fujian Province; plant extract obtained from *Sinapis alba* mustard seeds; bacterial nanocellulose provided by IPCET SB RAS, Bestfilament PLA granules, IE Berchuk D.Yu., Russia. As a plasticizer, the following were selected: TWIN-80 polysorbate, glycerin.

Results. The results of the study show that the introduction of bacterial nanocellulose into the studied objects increases the life of antioxidants. It was found that the vapor permeability of glycerin samples is higher compared to samples with the addition of Twin-80. The swelling values vary depending on the active component introduced.

Conclusions. The obtained data can be applied in the production of packaging materials for food processing..

KEYWORDS

bacterial nanocellulose, polylactide, plant extract, antioxidant activity



To cite: Shabanova, P. V., & Abaeva, A.V. (2024). Development of biodegradable active materials based on polylactide, nanobacterial cellulose and plant extracts. *Health, Food & Biotechnology*, 6(2), 58–67. <https://doi.org/10.36107/hfb.2024.i2.s211>

ВВЕДЕНИЕ

В современных научных исследованиях проявляется интерес к разработке биоразлагаемых упаковок, обладающих дополнительными свойствами, такими как антиокислительные, антибактериальные и антигрибковые эффекты. Создаваемые упаковки должны соответствовать всем механическим и санитарным стандартам, при этом не нанося вреда окружающей среде, чтобы служить заменой обычным пластиковым изделиям на основе нефти. Вопрос рационального использования вторичных ресурсов, включая растительные пищевые отходы, порождаемые, в частности, сельским хозяйством, остается актуальным. Растущая производительность промышленных отраслей является одним из ключевых факторов, способствующих загрязнению и негативно влияющим на современную экологическую ситуацию.

Одной из перспективных областей, где могут быть применены переработанные растительные пищевые отходы является производство активной упаковки для пищевых продуктов. Пленки на основе биополимеров обеспечивают барьер между внешней и внутренней упаковкой для поддержания качества пищевых продуктов (Menezes et al., 2019). Биополимерные пленки могут выступать в качестве носителей активных ингредиентов, таких как antimicrobials и антиоксидантные агенты (Arfat et al., 2014; Kirsh et al., 2020a).

Необходимость снижения количества процентной массы пластмассы в пищевой индустрии приводит к поиску новых экологических материалов растительного или животного происхождения. В настоящее время появляются научные разработки активных пленок для пищевой продукции, в составе которых в качестве основного материала или активного агента выступают растительные отходы (Бадретдинова, и соавт., 2023; Еремеева, Макарова & Елисеева, 2019; Kirsh et al., 2020b).

В исследованиях часто фигурирует способ создания пленок на основе биоразлагаемого сырья: хитозан (Nxumalo, et al., 2023; Wrońska, et al., 2023), желатин (Nurdiani, et al., 2022; Hu, et al., 2019), крахмал (Kumari, et al., 2023; Frangopoulos, et al., 2023), альгинат (Eslami, et al., 2023; Zinina, et al., 2023.), полилактид (Альхаир А., и др., 2023; Ja'skiewicz, et al., 2022)

Полилактидная кислота (PLA) — биоразлагаемый, биосовместимый, простой в обработке полимер, набирающий популярность в качестве замены обычных пластмасс в различных отраслях промышленности. Среди различных биоразлагаемых полимеров на основе полиэфиров полилактид или полилактидная кислота (PLA) является одним из наиболее важных биоразлагаемых полимеров на основе возобновляемых источников, поскольку

он поддается адаптации, термопластичен, биоразлагаем, биосовместим и обладает отличными механическими качествами, превосходной обрабатываемостью, оптической прозрачностью и низкой стоимостью. Производится с помощью технологии ферментирования из возобновляемых ресурсов, таких как сахарное сырье или кукурузный крахмал (Hussain et al., 2024). Однако PLA имеет внутренние ограничения и требует модификаций для повышения его характеристик.

Бактериальная наноцеллюлоза — наиболее перспективный материал для технической химии. Бактериальная наноцеллюлоза — это линейный полисахарид, состоящий из мономеров глюкозы, связанных между собой в результате реакций конденсационной полимеризации длинных цепей ангидро-глюкозных звеньев — 1,4-гликозидной связью. По сравнению с растительной целлюлозой бактериальная наноцеллюлоза представляет собой относительно чистую форму целлюлозы, обладающую определенными уникальными и превосходными структурными, физико-химическими и механическими свойствами, например, способностью впитывать воду до 90 % на 1 г бактериальной наноцеллюлозы, и меньшим размером микрофибрилл в отличие от своего растительного аналога (Mishra et al., 2022). Использование бактериальной наноцеллюлозы перспективно в разработке активной упаковки в качестве матрицы для антиоксидантных частиц. Наноцеллюлозы являются перспективными материалами с высоким газобарьером для упаковки пищевых продуктов на биологической основе (Guivier et al., 2023).

Для производства активных материалов становится востребовано использование растительных экстрактов в качестве антиокислительного агента. В статье (Moraczewski et al., 2020) использование экстрактов корицы, кофе, какао показало положительное влияние на физико-химические свойства полилактида, в особенности на «старение» материала, доказывая свою конкурентоспособность по сравнению с синтетическими добавками. В другой статье, авторы (Radusin et al., 2019) инкапсулировали чесночный экстракт по технологии электроформования, из их результатов видно, что введение чесночного экстракта улучшило пароизоляционные свойства и antimicrobials активность в отношении бактерий *E. Coli* и *S. Aureus*.

Таким образом в состав упаковки могут входить материалы, полученные из возобновляемых ресурсов и/или биологического сырья — полимеры, которые варьируются от гибких пленок до жестких материалов, обладающие высокой прочностью, и растительные экстракты, выступающие как активные агенты, и бактериальная наноцеллюлоза, как матрица для активного агента. Данные разработки потенциальны для производства экологичной упаковки.

Однако в настоящее время инкапсулирование растительных антиоксидантов экстрактов в полимерную матрицу с использованием бактериальной наноцеллюлозы является сложной задачей, поскольку ранее не сообщалось о соответствующих исследованиях по применению бактериальной наноцеллюлозы для регулирования высвобождения активных веществ растительных компонентов при разработке активных упаковочных материалов.

Основной целью данного исследования является разработка активной упаковочной пленки из полилактида с введением в неё растительного антиокислительного агента в композите с бактериальной наноцеллюлозой, определение физико-химических, антиокислительных свойств полученного биополимерного материала.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- (1) изучить технологии получения пленок из биоразлагаемого материала;
- (2) изучить антирадикальную активность по методу DPPH, физико-химические свойства образцов пленок;
- (3) проанализировать полученные данные, сделать вывод.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объекты и материалы

Исследования проводились на базе Высшей биотехнологической школы СамГТУ. Все показатели свойств модельных образцов биоразлагаемых активных пленок определяли в соответствии с существующими стандартными методами и использованием приборной базы Высшей биотехнологической школы. Объектами исследования являлись: (1) растительный экстракт, получаемый из пищевых отходов (шелуха луковички) чеснока *Allium sativum*, выращенного на территории Самарской области и собранного в период начала по конец сентября 2023 года; (2) растительный экстракт, получаемый из жмыха бархатцев *Tagetes erecta*, выращенных на территории Самарской области и собранных в период начала по конец сентября 2023 года; (3) растительный экстракт, получаемый из жмыха ягод барбариса *Berberis vulgaris* торговой марки *ZdravMarket*, ИП Крыштапович С.В., Россия; (4) растительный экстракт, получаемый из зеленого чая *Camellia sinensis*, собранного в провинции Фуцзянь, Китай, торговой марки *GurmanBazar*, ИП Белых Ф.М.; (5) растительный экстракт, получаемый из семян горчицы *Sinapis alba* торговой марки Никольские ПроРостки, ООО Амальгама; (6) бактериальная наноцеллюлоза, предоставленная ИПХЭТ СО РАН, (7) хлороформ химически чистый СТП ТУ СОМР 2–028–06. В качестве объекта ис-

следования был выбран биоразлагаемый материал: гранулы *PLA* торговой марки *Bestfilament*, ИП Берчук Д.Ю, Россия. В качестве пластификатора были выбраны: (1) полисорбат ТВИН-80 марки *A&T Cosmetics*, ИП Чайников И.П.; (2) глицерин (Шабанова; Борисова, 2023; Шабанова; Борисова, 2022).

Контрольный образец представляет собой пленку из полилактида, без добавления бактериальной наноцеллюлозы, антиоксидантного компонента, пластификатора.

Оборудование

Для проведения исследований использовались лабораторная мельница «Вьюга» (Экан, Россия), Cole-Parmer IKA 3725001 T25 высокоскоростной гомогенизатор (Ika-Werke, Германия), цифровой микрометр FIT-19909 (Fit Finch Industrial Tools, Канада), лабораторный микроскоп Celestron Laboratory (Celestron, Китай), фотометр КФК-3–01 (ЗОМЗ, Россия).

Методы и процедура исследования

Для получения экстрактов растительные материалы были заранее измельчены в лабораторной мельнице. Гранулы полилактида растворяли в хлороформе в соотношении 1:5, при температуре 60 °С в течение 3 ч, при постоянном механическом перемешивании. Извлечение экстрактивных веществ из растительных экстрактов осуществлялось ультразвуковой экстракцией 75 % этанолом при температуре 37 °С в течение 2 ч.

Для получения антибактериального агента к бактериальной целлюлозе добавляли профильтрованные спиртовые экстракты, время выдержки – 24 ч при температуре 25 °С. Полученный агент смешивали с пластификатором Твин-80 или глицерин и диспергировали в высокоскоростном гомогенизаторе (25000 об/мин) до однородного состояния. Полученный однородный агент смешивали с полимерным раствором.

Гранулы полилактида (25 г) растворяли в 50 мл хлороформа до получения однородного раствора. Раствор разливали в формы и сушили при температуре 25 ± 1 °С и относительной влажности 60 ± 2 % в течение 24 ч. Затем высушенные пленки осторожно отделяли от пластины и выдерживали 24 ч в эксикаторе, содержащий порошок безводного хлористого кальция (CaCl_2), при температуре 25 °С перед дальнейшими исследованиями.

Определение влажности проводили в соответствии с ГОСТ Р 54607.4–2015 «Услуги общественного питания. Методы лабораторного контроля продукции обществен-

ного питания.»¹ Микроскопирование пленок проводилось на лабораторном микроскопе Celestron Laboratory с линзой стократного увеличения (George, 2012). Толщину пленки измеряли с помощью цифрового микрометра *FIT-19909*. Выполняли пять измерений для каждой пленки: один в центре образца и четырех на различных участках периметра. Толщина пленки рассчитывалась как среднее значение. Определение паропрооницаемости пленок проводили по ГОСТ 21472–81 «Материалы листовые. Гравиметрический метод определения паропрооницаемости»². Определяли растворимость и степень набухания пленок по методикам (Peng et. all., 2013) с некоторыми изменениями. Кусочки пленки (25 мм × 25 мм) взвешивали исходные сухие массы. Затем пленки помещали в стаканы на 50 мл с 30 мл дистиллированной воды. Стаканы были закрыты пробками и хранились при температуре 25 °С в течение 24 ч. Воду, оставшуюся в стаканах сливали, а оставшиеся кусочки пленки высушивали на поверхности фильтровальной бумаги. Остатки пленки снова высушили при температуре 25 °С на воздухе для определения конечной сухой массы. Для каждого образца пленки было проведено двукратное повторение. Испытание на антирадикальную активность проводилось на основе методов, описанных в методиках (Peng et. all., 2013) с некоторыми изменениями. Методика основана на способности антиоксидантов исходного сырья связывать стабильный хромоген-радикал 2,2'-дифенил-1-пикрилгидразила (DPPH). Образцы плёнок 10 мм на 10 мм помещали в мензурки, содержащие 100 мл дистиллированной воды. За-

тем образцы пленки перемешивали магнитным полем при 250 об/мин с помощью 2-сантиметрового стержня, покрытого тефлоном. Отбирали по одному миллилитру образца в разные периоды времени при температуре 25 °С и смешивали с 4 мл 150 моль/л DPPH в метаноле. Смесь помещали в темное место при температуре 25 °С на 30 мин. Оптическую плотность смеси при длине волны 516 нм измеряли с помощью спектрофотометра. Все изменения выполнены в двух экземплярах. Результаты, представленные в виде активности по удалению радикалов DPPH. Антирадикальную активность выражали в виде концентрации исходного объекта в мг/мл, при которой происходило связывание 50 % радикалов.

Непрозрачность пленки определяли по методике (Peng et. all., 2013) путем измерения оптической плотности при 600 нм со спектрофотометром. Эксперимент проводился в двукратном повторении.

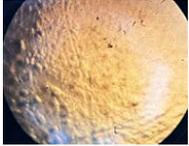
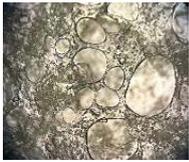
Анализ данных

Графики изменения ингибирования свободного радикала были построены в стандартной программе Excel 2019.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В Таблице 1 представлены физико-химические показатели объектов исследования.

Таблица 1
Результаты физико-химических исследований

Образец	Микроскопирование Увеличение 100 ^x	Толщина, мм	Непрозрачность	Влагодержание, %	Степень растворимости, %	Степень набухаемости, %	Паропроницаемость, 10 ⁻¹⁰ × г × м ⁻¹ × с ⁻¹ × Па ⁻¹
1	2	3	4	5	6	7	8
Контрольный образец		0,900	1,24	2,24	8,20	2,10	0,056
<i>Пластификатор Твин-80</i>							
Пленка с экстрактом зеленого чая		0,305	3,12	5,88	5,97	11,00	0,035

¹ ГОСТ Р 54607.4–2015 (2019). Услуги общественного питания. Методы лабораторного контроля продукции общественного питания. Часть 4. Методы определения влаги и сухих веществ. – М.: Стандартинформ.

² ГОСТ 21472–81 (2008) Материалы листовые. Гравиметрический метод определения паропрооницаемости. – М.: Стандартинформ.

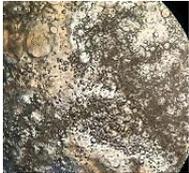
Образец	Микроскопирование Увеличение 100x	Толщина, мм	Непрозрачность	Влагосодержание, %	Степень растворимости, %	Степень набухаемости, %	Паропроницаемость, $10^{-10} \times \text{г} \times \text{м}^{-1} \times \text{с}^{-1} \times \text{Па}^{-1}$
1	2	3	4	5	6	7	8
Пленка с экстрактом семян горчицы		0,480	0,59	1,19	11,09	20,21	0,032
Пленка с экстрактом ягод барбариса		0,208	2,68	5,97	6,42	8,56	0,013
Пленка с экстрактом из чесночной шелухи		0,043	0,605	4,80	26,76	15,47	0,562
<i>Пластификатор Глицерин</i>							
Пленка с экстрактом зеленого чая		0,316	3,07	8,82	5,98	1,99	3,226
Пленка с экстрактом семян горчицы		0,740	2,30	14,74	22,67	0,99	0,226
Пленка с экстрактом ягод барбариса		0,353	3,37	7,5	1,79	2,24	1,228
Пленка с экстрактом из чесночной шелухи		0,039	2,65	1,60	0,97	1,09	1,360

Рисунок 1

Зависимость ингибирования свободного радикала пленок с добавлением активного агента и пластификатора Твин-80 от времени

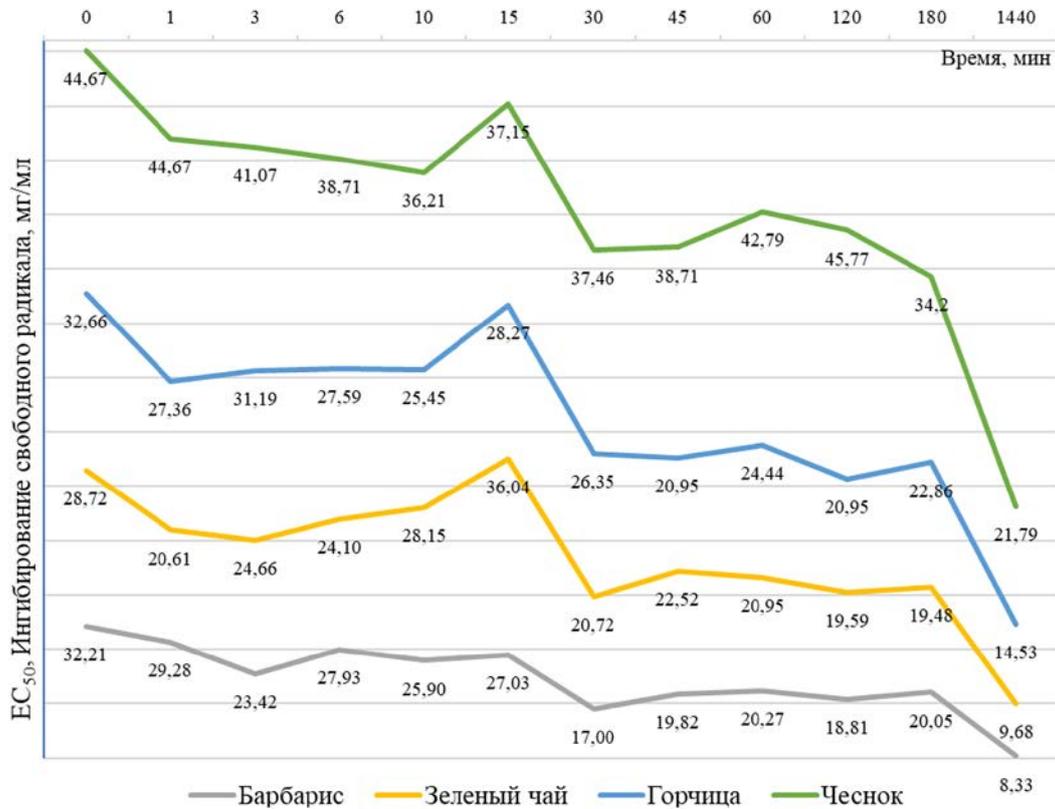
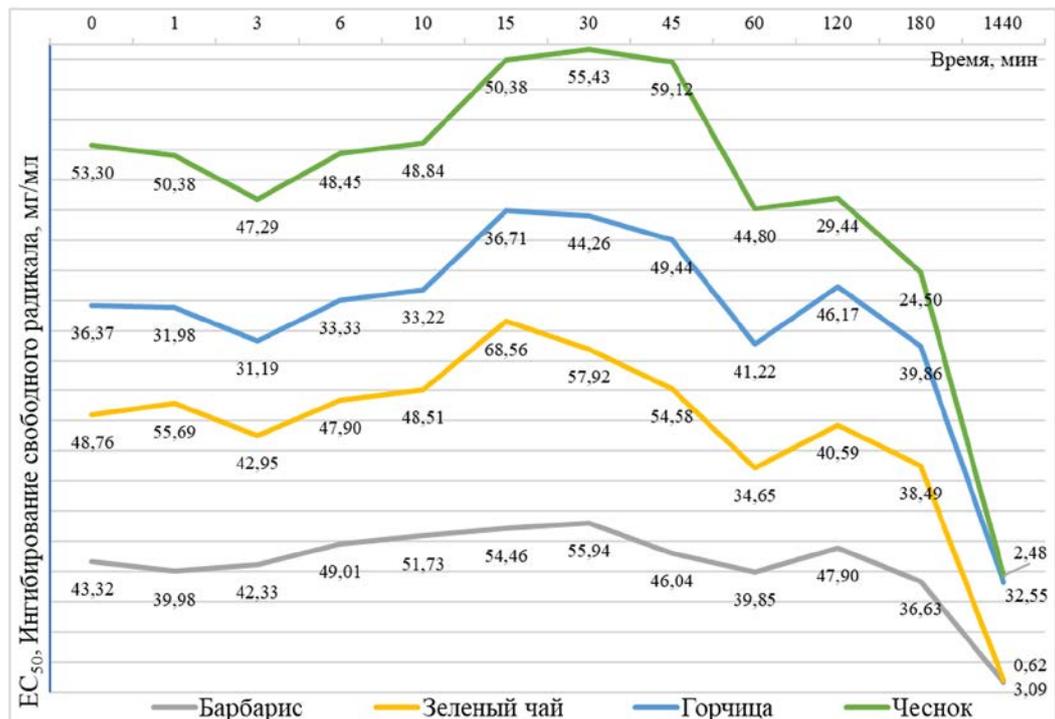


Рисунок 2

Зависимость ингибирования свободного радикала пленок с добавлением активного агента и пластификатора Глицерин от времени



На Рисунках 1, 2 представлены графики зависимости ингибирования свободного радикала пленок с добавлением активного агента и пластификатора (Твин-80 или глицерин) от времени.

ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Способность DPPH поглощать радикалы была изучена в определенных интервалах времени, чтобы продемонстрировать высвобождение антиоксидантных веществ в имитированных естественных условиях.

Активность по удалению свободных радикалов у контрольного образца наблюдалась значительно низкая. Введение бактериальной целлюлозы, пропитанной растительным экстрактом, повышало способность DPPH к удалению радикалов. Анализируя результаты приведенных исследований, можно сделать вывод, что введение бактериальной наноцеллюлозы вместе с пластификатором (твин-80 или глицерин) положительно влияет на длительность действия активного компонента. Импульсные реакции наблюдаются на 0, 15, 60 минутах у образцов с введением Твин-80, затем наблюдается постепенное снижение. У глицериновых образцов импульсные реакции наблюдаются на 15 или 30 минутах, в зависимости от антиокислительного агента, затем наблюдается резкий спад, что, вероятно, скорость высвобождения зависит от быстрого снижения концентрации глицерина.

В зависимости от пластификатора, образцы с разными экстрактами реагировали с растворителем (дистиллированная вода) с определенной интенсивностью: молекулы растворителя, проникая в сетчатую структуру, приводили к набуханию матрицы, эти изменения приводили к диффузии активных веществ, тем самым, выявляя зависимость способности набухания и растворения сложноструктурного биополимера и межмолекулярных связей между биополимером, микрофибриллами бактериальной наноцеллюлозы и растительным экстрактом.

Значения степени набухаемости варьируются в зависимости от введенного активного компонента — микрочастицы растительного экстракта вплетаясь в бактериальную наноцеллюлозу добавочно впитывают жидкость. Степень растворимости меняется из-за неоднородного нахождения наноцеллюлозы по всей плотности образца, краевые частицы целлюлозы не имея зацепа, растворялись в растворителе.

Образование пустот наблюдалось у всех образцов вне зависимости от используемого пластификатора.

Результаты микроскопирования показали, что образцы вне зависимости от добавленного пластификатора имеют неоднородную структуру — наибольшее количество включений пузырьков наблюдаются у образцов с экстрактом из зеленого чая (Твин-80, глицерин), с экстрактом из чесночной шелухи (Твин-80). Неоднородность также объясняется сложностью гомогенизации бактериальной наноцеллюлозы.

Установлено, что у большинства образцов значения толщины варьируются. Определено, что большие показатели наблюдаются у образцов с добавлением Твин-80 с растительными экстрактами из чеснока (0,043 мм). Высокие показатели наблюдаются у образцов с добавлением глицерина с растительными экстрактами из горчицы (0,740 мм), барбариса (0,353 мм). Незначительные изменения наблюдаются у образца с добавлением зеленого чая: Твин-80—0,305, глицерин — 0,316.

Низкое значение влагосодержания зависит от многих факторов: использование поверхностно-активных веществ (пластификаторы), высокое содержание гидрофобных соединений (например, эфирное масло) внедрение гидрофильных материалов (бактериальная наноцеллюлоза). Высокое содержание эфирного масла у образцов с добавлением горчицы (Твин-80—1,19%), чеснока (Твин-80—4,80%), зеленого чая (Твин-80—5,88%), барбариса (Твин-80—5,97%) способствовало снижению содержания воды, несмотря на гидрофильные свойства бактериальной наноцеллюлозы. Гидрофильный эффект от глицерина и бактериальной наноцеллюлозы преимущественно повлиял на образцы с добавлением барбариса (7,50%), зеленого чая (7,50%), чеснока (11,60%), горчицы (14,74%), несмотря на содержание эфирных масел.

Степень набухаемости и степень растворимости показана неоднозначно. Среди образцов с добавлением глицерина наблюдаются низкие показатели степени растворимости. Пластификатор Твин-80 является солюбилизатором, растворяя гидрофобные эфирные масла, открывая доступ бактериальной наноцеллюлозе к воде, поэтому показатели равны: экстракт зеленого чая (11,00%), экстракт из ягод барбариса (20,21%), экстракт из семян горчицы (8,56%), экстракт из шелухи чеснока (15,47%). Степень растворимости у образцов с добавлением пластификаторов зафиксирована высокая: горчица (Твин-80—11,09%, глицерин — 22,67%), чеснок (Твин-80—26,76%) по сравнению с контрольным образцом. Такая растворимость была связана с гидрофильными свойствами пленок, пластификатора и бактериальной наноцеллюлозы. Низкая способность к растворению обнаружилась у образцов: зеленый чай (Твин-80—5,97%, глицерин — 5,98%), барбарис (Твин-80—6,42%, глицерин — 1,79%), чеснок (глицерин — 1,09%). Это объясняется, что уменьшение степени сшивания межмолекулярных цепей, приведет к уменьшению силы втягивания,

что позволит поглощать больше воды. В исследовании, вероятно происходит сильное взаимодействие между полилактидом, бактериальной наноцеллюлозой и экстрактами, что приводило к снижению степени сшивания межмолекулярной цепи в матрице, что приводило к низкой степени растворимости пленочной матрицы и высокой степени набухаемости.

Паропроницаемость у всех образцов достаточно низкая. Эффект объясняется взаимодействием между молекулярными структурами внутри пленки: агрегация фибрилл бактериальной наноцеллюлозы, пластификатора и частиц растительного экстракта приводит к снижению коэффициента паропроницаемости.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенных физико-химических исследований образцов биоразлагаемых активных пленок, определено, что образцы нуждаются в усовершенствовании технологии получения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Альхаир, А., Щукина, Е. А., Губанова, М. И., Кириш, И. А., & Ермилова, А. М. (2023). Разработка и исследование активного упаковочного материала на основе крахмала с использованием в качестве антимикробной добавки масленного экстракта гвоздики. *Хранение и переработка сельхозсырья*, (4), 16–31. <https://doi.org/10.36107/spfp.2023.4.474>

Alkhair, A., Shchukina, E. A., Gubanova, M. I., Kirsh, I. A., & Ermilova, A. M. (2023). Development of an active starch-based packaging material using clove oil extract as an antimicrobial additive. *Storage and Processing of Farm Products*, (4), 16–31. <https://doi.org/10.36107/spfp.2023.4.474> (In Russ.)

Еремеева, Н. Б., Макарова, Н. В., & Елисеева, Е. А. (2019). Оценка органолептических и физико-химических свойств съедобных стаканов на основе яблочного сырья с использованием различных наполнителей: сушеных снеков, орехов, семян, зерновых хлопьев. *Вестник Камчатского государственного технического университета*, (50), 38–45.

Eremeeva, N. B., Makarova, N. V., & Eliseeva, E. A. (2019). Evaluation of organoleptic and physicochemical properties of edible cups based on apple raw materials using various fillers: dried snacks, nuts, seeds, cereal flakes. *Bulletin of Kamchatka State Technical University*, (50), 38–45. (In Russ.)

Шабанова, П. В., & Борисова, А. В. (2023) Разработка полилактидной плёнки с эфирным маслом мелиссы.

Установлено, что паропроницаемость образцов с глицерином выше по сравнению с образцами с добавлением Твин-80. Значения набухаемости варьируются в зависимости от введенного активного компонента. Результаты исследования показывают, что введение бактериальной наноцеллюлозы в исследуемые объекты увеличивает срок действия антиоксидантов. Результаты, представленные в статье, показывают, что разработка данного продукта является многообещающим решением в производстве активных биоразлагаемых пленок.

АВТОРСКИЙ ВКЛАД

Шабанова П.В.: отслеживание воспроизводимости результатов/экспериментов, подготовка и создание рукописи, её комментирование или пересмотр, включая этапы до или после публикации рукописи.

Абаева А.В.: научное руководство исследованием, подготовка и создание черновика рукописи, концептуализация, разработка методологии исследования, курирование данных.

В *Пищевые технологии и биотехнологии* (с. 698–707). КНИТУ.

Shabanova, P. V., & Borisova, A. V. (2023) Development of polylactide film with lemon balm essential oil. In *Food Technology and Biotechnology* (pp. 698–707). KNIU. (In Russ.)

Шабанова, П. В., & Борисова, А. В. (2022) Биоразлагаемая активная пленка на основе PLA с добавлением эфирного масла шалфея. В *Science Tech: Инновации в научно-практических исследованиях* (с. 69–72). ЗапСибНЦ

Shabanova, P. V., & Borisova, A. V. (2022) Biodegradable active film based on PLA with the addition of sage essential oil. In *Science Tech: Innovations in scientific and practical research* (pp. 69–72). ZapSibNC. (In Russ.)

Arfat, Y. A., Benjakul, S., Prodpran, T., & Osako, K. (2014). Development and characterisation of blend films based on fish protein isolate and fish skin gelatin. *Food Hydrocolloids*, 39, 58–67. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2013.12.028>

Badredtinova, I., & Kasatkin, V. (2023). Production of biodegradable eco-package for food storage and transportation from flax shive by vacuum casting. *Vestnik Iževskoj Gosudarstvennoj Sel'skhozâjstvennoj Akademii*, 2(74), 56–64. https://doi.org/10.48012/1817-5457_2023_2_56-64

Eslami, Z., Elkoun, S., Robert, M., & Adjallé, K. (2023). A review of the effect of plasticizers on the physical and mechanical

- properties of Alginate-Based films. *Molecules/Molecules Online/Molecules Annual*, 28(18), 6637. <https://doi.org/10.3390/molecules28186637>
- Frangopoulos, T., Marinopoulou, A., Goulas, A., Likotrafti, E., Rhoades, J., Petridis, D., Kannidou, E., Stamelos, A., Theodoridou, M., Arampatzidou, A., Tosounidou, A., Tsekmes, L., Tsihlakis, K., Gkikas, G., Tourasanidis, E. V., & Karageorgiou, V. (2023). Optimizing the functional properties of Starch-Based biodegradable films. *Foods*, 12(14), 2812. <https://doi.org/10.3390/foods12142812>
- Guivier, M., Almeida, G., Domenek, S., & Chevigny, C. (2023). Resilient high oxygen barrier multilayer films of nanocellulose and polylactide. *Carbohydrate Polymers*, 312, 120761. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2023.120761>
- Hu, X., Li, Y., Han, L., Li, S., & Song, L. (2019). Characterization of antioxidant and antibacterial gelatin films incorporated with Ginkgo biloba extract. *RSC Advances*, 9(47), 27449–27454. <https://doi.org/10.1039/c9ra05788a>
- Hussain, M., Khan, S. M., Shafiq, M., & Abbas, N. (2024). A review on PLA-based biodegradable materials for biomedical applications. *Giant*, 18, 100261. <https://doi.org/10.1016/j.giant.2024.100261>
- Jaśkiewicz, A., Budryn, G., Nowak, A., & Efenberger-Szmechtyk, M. (2020). Novel Biodegradable Starch Film for Food Packaging with Antimicrobial Chicory Root Extract and Phytic Acid as a Cross-Linking Agent. *Foods*, 9(11), 1696. <https://doi.org/10.3390/foods9111696>
- Kirsh, I., Bannikova, O., Beznaeva, O., & Tveritnikova, I. (2020a). Research of the influence of the ultrasonic treatment on the melts of the melts of the polymeric compositions for the creation of packaging materials with antimicrobial properties and biodegradability. *Polymers*, 12(2), 275. <https://doi.org/10.3390/polym12020275>
- Kirsh, I., Beznaeva, O., Bannikova, O., Gubanova, M., Tveritnikova, I. (2020b) Influence of the ultrasonic treatment on the properties of polybutylene adipate terephthalate, modified by amicrobial additive. *Polymers*, 12(10), 1–13. <https://doi.org/10.3390/polym12102412>
- Kumari, S., Yadav, B. S., & Yadav, R. B. (2023). Development and characterization of mung bean starch-based composite films incorporated with sweet potato starch nanocrystals for their morphological and thermo-mechanical properties. *Biomass Conversion and Biorefinery*. <https://doi.org/10.1007/s13399-023-05212-7>
- Menezes, M.D., Pires, N.D., da Cunha, P.L., de Freitas Rosa, M., de Souza, B.W., Feitosa, J.P., & Souza Filho, M.D. (2019). Effect of tannic acid as crosslinking agent on fish skin gelatin-silver nanocomposite film. *Food Packaging and Shelf Life*, 19, 7–15. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2018.11.005>
- Mishra, S., Singh, P. K., Pattnaik, R., Kumar, S., Ojha, S. K., Srichandan, H., Parhi, P. K., Jyothi, R. K., & Sarangi, P. K. (2022). Biochemistry, Synthesis, and Applications of Bacterial cellulose: a review. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 10. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.780409>
- Moraczewski, K., Pawłowska, A., Stepczyńska, M., Malinowski, R., Kaczor, D., Budner, B., Gocman, K., & Rytlewski, P. (2020). Plant extracts as natural additives for environmentally friendly polylactide films. *Food Packaging and Shelf Life*, 26, 100593. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2020.100593>
- Nurdiani, R., Ma'rifah, R., Busyro, I., Jaziri, A. A., Prihanto, A. A., Firdaus, M., Talib, R. A., & Huda, N. (2022). Physical and functional properties of fish gelatin-based film incorporated with mangrove extracts. *PeerJ*, 10, e13062. <https://doi.org/10.7717/peerj.13062>
- Nxumalo, K. A., Fawole, O. A., & Aremu, A. O. (2023). Development of chitosan-based active films with medicinal plant extracts for potential food packaging applications. *Processes*, 12(1), 23. <https://doi.org/10.3390/pr12010023>
- Peng, Y., Wang, Y., & Li, Y. (2013). Development of tea extracts and chitosan composite films for active packaging materials. *International Journal of Biological Macromolecules*, 59, 282–289. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2013.04.019>
- Radusin, T., Torres-Giner, S., Stupar, A., Ristić, I., Miletić, A., Novaković, A., & Lagarón, J. M. (2019). Preparation, characterization and antimicrobial properties of electrospun polylactide films containing *Allium ursinum* L. extract. *Food Packaging and Shelf Life*, 21, 100357. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2019.100357>
- Wrońska, N., Katir, N., Nowak-Lange, M., Kadib, A. E., & Lisowska, K. (2023b). Biodegradable Chitosan-Based films as an alternative to plastic packaging. *Foods*, 12(18), 3519. <https://doi.org/10.3390/foods12183519>
- Zinina, O., Merenkova, S., & Galimov, D. M. (2023). Development of Biodegradable Alginate-Based Films with Bioactive Properties and Optimal Structural Characteristics with Incorporation of Protein Hydrolysates. *Sustainability*, 15(20), 15086. <https://doi.org/10.3390/su152015086>