

Исследование свойств пищевых пленок на основе агара с добавлением функциональных компонентов

О. В. Зинина^{1,2✉}, Е. А. Вишнякова¹, С. П. Меренкова¹, О. П. Неверова²

¹Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), Челябинск, Россия

²Уральский государственный аграрный университет, Екатеринбург, Россия

✉E-mail: zininaov@susu.ru

Аннотация. В условиях повышения экологической нагрузки со стороны накапливаемых синтетических упаковочных материалов в объектах окружающей среды возникает необходимость разработки новых составов биоразлагаемых пленок, дополнительно обладающих функциональными свойствами для повышения сроков хранения продукции. **Новизна** исследований заключается в получении новых видов биоразлагаемых активных пленок (с добавлением в качестве активного компонента белкового гидролизата), а также данных об их свойствах. **Цель исследования** – установление свойств биоразлагаемых пленок на основе агара с добавлением суспензии гидролизата белка и КМЦ как активных компонентов. **Методы исследований.** У контрольного (в составе агар и глицерин) и опытных образцов пленок (в составе агар, глицерин и суспензия из КМЦ и белкового гидролизата в количестве 5, 10 и 15 % от массы биокомпозиата) определили механические свойства (предел прочности и относительное удлинение), микроструктуру при увеличении микроскопа $\times 100$, антиоксидантные свойства (антирадикальная активность DPPH, содержание фенолов), паропроницаемость, растворимость и влагопоглощение. **Результаты.** Введение суспензии в состав биокомпозиата оказало отрицательное влияние на механическую прочность пленки – предел прочности снизился с 9,71 МПа у контрольного образца до 3,35 МПа у опытного образца с 15 % суспензии, при этом относительное удлинение оказалось максимальным у образца с 10 % суспензии – 54,9 %. Антиоксидантные свойства пленок повышались с добавлением суспензии: антирадикальная активность DPPH увеличилась с 57,65 % у контрольного образца до 63,81 % у опытного образца с 15 % суспензии, а содержание фенолов – с 0,253 у контрольного образца до 0,502 мг·экв галловой кислоты на 1 г у опытного образца с 10 % суспензии. Отмечено, что добавление суспензии оказало значительное влияние на паропроницаемость и влагопоглощение. Таким образом, полученные результаты показали необходимость проведения дальнейших исследований хранимоспособности продуктов питания с разной влажностью при упаковке в испытываемые пленки.

Ключевые слова: пищевая пленка, биополимер, механическая прочность, антиоксидантная активность, агар, белковый гидролизат, суспензия.

Для цитирования: Зинина О. В., Вишнякова Е. А., Меренкова С. П., Неверова О. П. Исследование свойств пищевых пленок на основе агара с добавлением функциональных компонентов // Аграрный вестник Урала. 2023. Т. 23, № 12. С. 55–64. DOI: 10.32417/1997-4868-2023-23-12-55-64.

Дата поступления статьи: 26.09.2023, **дата рецензирования:** 09.10.2023, **дата принятия:** 16.10.2023.

Study of the properties of food films based on agar with the addition of functional components

O. V. Zinina^{1,2✉}, E. A. Vishnyakova¹, S. P. Merenkova¹, O. P. Neverova²

¹South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia

²Ural State Agrarian University, Ekaterinburg, Russia

✉E-mail: zininaov@susu.ru

Abstract. In conditions of increasing environmental load from accumulated synthetic packaging materials in environmental objects, there is a need to develop new compositions of biodegradable films that additionally have functional properties to increase the shelf life of products. **The scientific novelty** of the research lies in the production of new types of biodegradable active films with the addition of protein hydrolyzate as an active component, as well as data on their properties. **The purpose** of the study is to establish the properties of biodegradable films based on agar with the addition of a suspension of protein hydrolyzate and CMC as active components. Research methods. The control (composed of agar and glycerin) and test samples of films (composed of agar, glycerin and a suspension of MCC and protein hydrolyzate in an amount of 5, 10 and 15 % by weight of the biocomposite) were determined for mechanical properties, microstructure, antioxidant properties, vapor permeability, solubility, and moisture absorption. **Results.** The introduction of a suspension into the composition of the biocomposite had a negative effect on the mechanical strength of the film – the tensile strength decreased from 9,71 MPa for the control sample to 3,35 MPa for the test sample with 15 % suspension, while the relative elongation was maximum for the sample with 10 % suspension – 54,9 %. The antioxidant properties of the films increased with the addition of the suspension: the antiradical activity of DPPH increased from 57.65 % in the control sample to 63.81 % in the test sample with 15 % suspension, and the phenol content – from 0.253 in the control sample to 0.502 mEq of gallic acid per 1 g for a prototype with 10% suspension. It was noted that the addition of the suspension had a significant effect on vapor permeability and moisture absorption. Thus, the results obtained showed the need for further research into the storage capacity of food products with different humidity levels when packaged in tested films.

Keywords: food film, biopolymer, mechanical strength, antioxidant activity, agar, protein hydrolysate, suspension.

For citation: Zinina O. V., Vishnyakova E. A., Merenkova S.P., Neverova O. P. Issledovanie svoystv pishchevykh plenok na osnove agara s dobavleniem funktsional'nykh komponentov [Study of the properties of food films based on agar with the addition of functional components] // Agrarian Bulletin of the Urals. 2023. Vol. 23, No. 12. Pp. 55–64. DOI: 10.32417/1997-4868-2023-23-12-55-64. (In Russian.)

Date of paper submission: 26.09.2023, **date of review:** 09.10.2023, **date of acceptance:** 16.10.2023.

Постановка проблемы (Introduction)

Создание и развитие современных технологий упаковки пищевых продуктов является важной частью в обеспечении безопасной жизнедеятельности человека и в сохранении окружающей среды. В настоящее время большинство упаковок получают с применением небiorазлагаемых материалов на основе ископаемого топлива, что создает огромное количество трудноперерабатываемых отходов по всему миру. Сокращение этих отходов является одной из важнейших задач для ученых и производителей по всему миру. Решением данной проблемы может стать применение биоразлагаемых материалов, которые могут легко разлагаться бактериями, грибами, дрожжами и образовывать воду, метан, углекислый газ и другие экологически безопасные компоненты [1].

Биокomпозитные разлагаемые пленки – пленки, содержащие два природных материала или более, которые легко биоразлагаются в условиях окружающей среды. Композиционный материал состоит из двух или более компонентов, которые различаются по химическому составу и в комплексе обладают более высокими функциональными качествами, чем отдельные компоненты. Образуется такой материал путем выравнивания и встраивания биохимически активных и негибких компонентов, таких как волокна и частицы, в связующую матрицу биополимера.

Данные упаковочные материалы могут быть созданы на основе крахмала, пектина и других веществ, обладающих значительной водосвязывающей и гелеобразующей способностью. Однако пленки, созданные только на основе этих веществ, имеют определенные несовершенства, например, недостаточно высокую механическую прочность; невыраженную антиоксидантную и антибактериальную активность [2].

С целью улучшения механических и биоактивных свойств упаковочных материалов исследователи включают в состав матрицы биополимеров наночастицы металлов, растворы и эмульсии эфирных масел растений, целлюлозу и ее производные [3–5].

Обозначенные недостатки однокомпонентных составов пленок относятся и к белковым компонентам. Функциональные свойства белков в составе упаковочных материалов обычно улучшают за счет комплексообразования с полисахаридами. Эффективность формирования белково-полисахаридных комплексов и их растворимость, в основном зависят от уровня pH, ионной силы, соотношения биополимеров и концентрации [6].

Микрокристаллическая целлюлоза (МКЦ) представляет собой очищенную, частично деполимеризованную целлюлозу, которая ценится из-за ее реологических, физических и механических свойств. Прочные водородные связи и большая

площадь поверхности делают МКЦ эффективной для применения в составе биополимеров. Использование агропромышленных отходов в качестве источника целлюлозной биомассы является рациональной альтернативой синтетическим материалам [7]. МКЦ используется в различных отраслях промышленности: фармацевтической, косметической, пластмассовой, пищевой и полимерной – благодаря своим уникальным физико-химическим свойствам, таким как низкая стоимость, низкая плотность, высокие механические свойства, высокая реакционная способность и биоразлагаемость [8]. МКЦ используется в составе упаковочных материалов в качестве экологически чистого наполнителя, улучшающего механические свойства и снижающего чувствительность к воде, что объясняется активным взаимодействием между целлюлозой и биополимерами. Пленки с добавлением МКЦ обладают улучшенными характеристиками и могут использоваться для изготовления упаковки пищевых продуктов, пластиковых стаканчиков, прозрачной пленки, биоразлагаемых упаковочных материалов. Активные композитные упаковочные системы на основе МКЦ демонстрируют потенциал при пролонгировании срока хранения и сохранении свежести пищевых продуктов. Несколько исследований доказали многообещающий потенциал включения смеси эфирных масел и МКЦ для создания функциональной активной упаковки для сохранения пищевых продуктов [1–3]. Кроме того, упаковочные материалы на основе МКЦ с различными активными компонентами проявляют антибактериальную активность, снижают окислительную нагрузку, а также демонстрируют антимикробные, барьерные и механические свойства. МКЦ обладает широким спектром функциональных характеристик, значимых при проектировании пищевых систем, – таких как способность суспендировать твердые частицы, сохранять их стабильность при нагревании, предотвращать образование кристаллов льда, стабилизировать эмульсии, сохранять стабильность пены, изменять текстуру веществ [9].

Микрокристаллическая целлюлоза разрешена для использования в пищевых продуктах, поскольку она нетоксична и гипоаллергенна. Доказано, что добавление МКЦ в состав биополимерной пленки положительно влияет на прочность конечного образца. Так, например, выяснено, что прочность на разрыв композитной пленки при добавлении МКЦ оказалась выше в 3,5 раза по сравнению с пленкой без добавления МКЦ, что позволило получить пленку с хорошими механическими свойствами [10].

Помимо механических характеристик, МКЦ в составе пленок может также положительно влиять и на гидрофобные свойства. Известно, что добавление 0,5 % МКЦ в состав пленки из крахмала мани-

оки увеличивает прочность на разрыв на 484,5 %, добавление 2 % МКЦ увеличивает гидрофобность пленки на 60,0 %. Однако при добавлении данного компонента у этих пленок снижалась термостабильность [11]. В пленках на основе кукурузного крахмала добавление 1 % МКЦ, наоборот, значительно повысило термическую стабильность за счет увеличения пиковой температуры разложения с 312,3 до 321 °С. Механическая прочность пленки увеличилась с 6,03 МПа (чистая пленка) до 22,33 МПа (с 5 % МКЦ) [12].

Положительный результат показало и добавление МКЦ в хитозановые пленки. Так, добавление 2,5 % МКЦ позволило значительно улучшить прочность и жесткость, а также снизить проницаемость для кислорода и водяного пара, что является важным свойством при использовании пленок для упаковки пищевых продуктов [13].

Производные МКЦ также широко используют при получении биоразлагаемых материалов, однако изменение их свойств химической модификацией приводит к значительному изменению и свойств конечных продуктов на их основе, что в том числе отражается и на характеристиках пленок. Например, карбоксиметилцеллюлозу (КМЦ) благодаря хорошей растворимости в воде, биоразлагаемости и свойствам сорбента используют для получения smart-упаковки: активные компоненты, закрепленные молекулами КМЦ, обладают выраженными антиоксидантными и антимикробными свойствами и позволяют увеличивать сроки хранения продукции [14].

КМЦ является водорастворимым коллоидом, универсальным водоудерживающим агентом, применимым во многих отраслях промышленности. Вязкие растворы КМЦ эффективно связывают внутри коллоидной матрицы биоактивные компоненты и длительно сохраняют стабильность и пластичность вязкого раствора. Доказано, что КМЦ эффективно абсорбирует на поверхности вводимые в раствор частицы, стабилизирует биополимерную систему даже при небольших концентрациях в широком диапазоне температуры и уровня pH [15, 16].

КМЦ обладает высокой вязкостью при низких концентрациях, поэтому широко используется как пищевая добавка – загуститель и стабилизатор в пищевых продуктах [17]. Она обладает отличными механическими свойствами, создает прочный барьер против кислорода, углекислого газа и липидов и благодаря этому имеет широкий спектр применения [18]. Имеются данные об улучшении прочности пленок на разрыв, удлинения, сопротивления воздуху, гидрофобности, кислородонепроницаемости пленок, содержащих КМЦ [19].

Волокна целлюлозы КМЦ могут служить оптимальной матрицей для встраивания в состав пленки активных компонентов, таких как белковые гидро-

лизаты. Причем выраженность функциональных свойств биоразлагаемых пленок зависит как от типа основного биополимера, так и от способа введения активных компонентов в состав пленок.

Целью исследований является установление свойств биоразлагаемых пленок на основе агара с добавлением суспензии гидролизата белка и КМЦ как активных компонентов.

Методология и методы исследования (Methods)

Объектами исследования являются пленки, полученные на основе биокомпозита следующего состава: основа – агар (Agar-Agar natural торговой марки Nulka, Россия), глицерин (ОАО «Самарамедпром», Россия), активные компоненты – белковый гидролизат, карбоксиметилцеллюлоза (КМЦ, FH 6000, Китай). Белковый гидролизат и КМЦ вводили в состав биокомпозита в виде суспензии в количестве 5, 10 и 15 % от его массы. В контрольном образце пленки в состав композита входили только агар и глицерин.

С целью эффективного встраивания биоактивных частиц БГ в матрицу пленки, предварительно готовили наносуспензию на основе КМЦ. Для создания коллоидного раствора (суспензии) КМЦ 0,5 % порошка КМЦ растворяли в воде при непрерывном перемешивании, а затем с целью получения стабильной наносуспензии применяли гомогенизацию при 3800 об/мин (Stegler S-10, Китай) в течение 5 мин. В полученный коллоидный раствор вносили жидкий белковый гидролизат в объеме 10 %, и после двухминутного перемешивания вновь проводили гомогенизацию с целью однородного распределения частиц белкового гидролизата в системе полисахарида.

Для получения биоразлагаемой пленки 2,5-процентный раствор агара при перемешивании нагре-

вали до 90–95 °С, после охлаждения до 45–50 °С вносили глицерин и суспензию с белковым гидролизатом, после тщательного размешивания пленку формировали отливкой в металлические формы и оставляли на сушку в течение 18–20 ч. Технология получения пленок схематично представлена на рис. 1. Для каждой партии изготовили по пять образцов пленок.

Для изучения структуры образцов пленок использовали биологический микроскоп «Микромед-1» при увеличении ×100.

Толщину пленок вычисляли как среднее значение пяти измерений на разных участках пленки, определенных с помощью механического микрометра. Для определения механических свойств пленок (предел прочности и относительное удлинение) вырезали образцы гантелеобразной формы длиной 100 мм с помощью вырубного прессы IDM Instruments C0022. Образцы закрепляли в пневматических захватах INSTRON. Измерения проводили на испытательной машине INSTRON со скоростью движения траверсы 50 мм/мин.

Для оценки потенциальной антиоксидантной активности пленок определяли содержание полифенолов и антирадикальную активность DPPH.

Антирадикальную активность (%) определяли методом DPPH. Спиртовой экстракт пленки смешивали с раствором DPPH (раствор 2,2-дифенил-1-пикрилгидразила) и выдерживали 30 мин. Оптическую плотность измеряли на спектрофотометре Jenway 171 (6405 UV/Vis, Великобритания) при 515 нм. Общее содержание фенолов также определяли в этанольном экстракте биопленки, используя реактив Фолина – Чокальтеу. Оптическую плотность определяли при длине волны 700 нм.

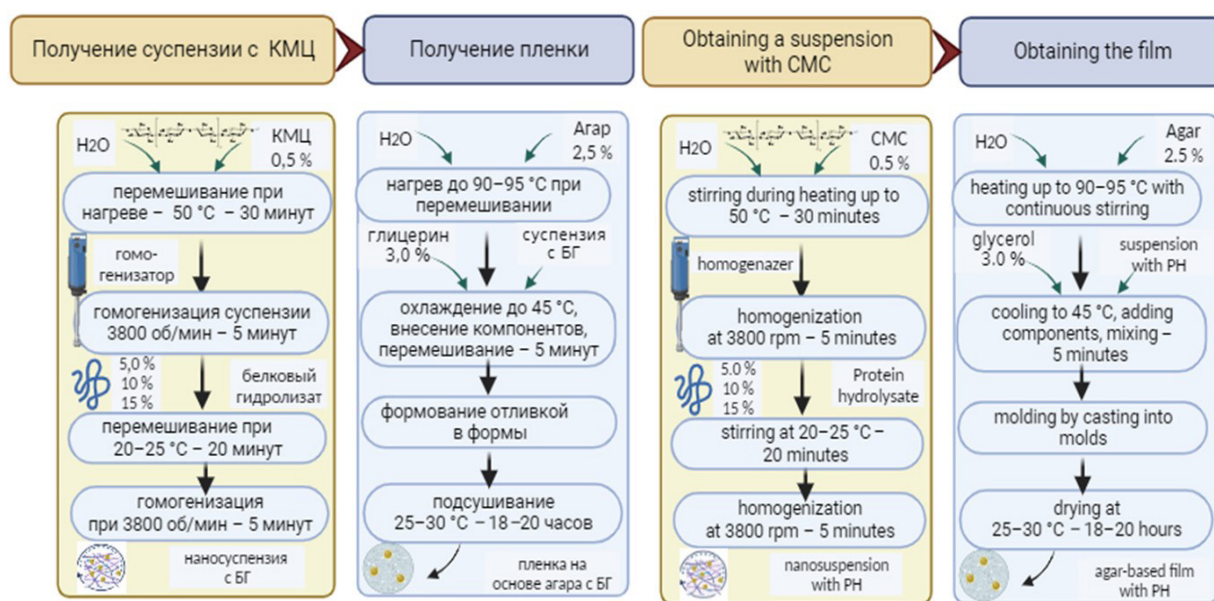


Рис. 1. Технология получения пленок на агаре с суспензией на основе КМЦ и белкового гидролизата: БГ – белковый гидролизат

Fig. 1. Technology for producing films on agar with a suspension based on CMC and protein hydrolysate: PH – protein hydrolysate

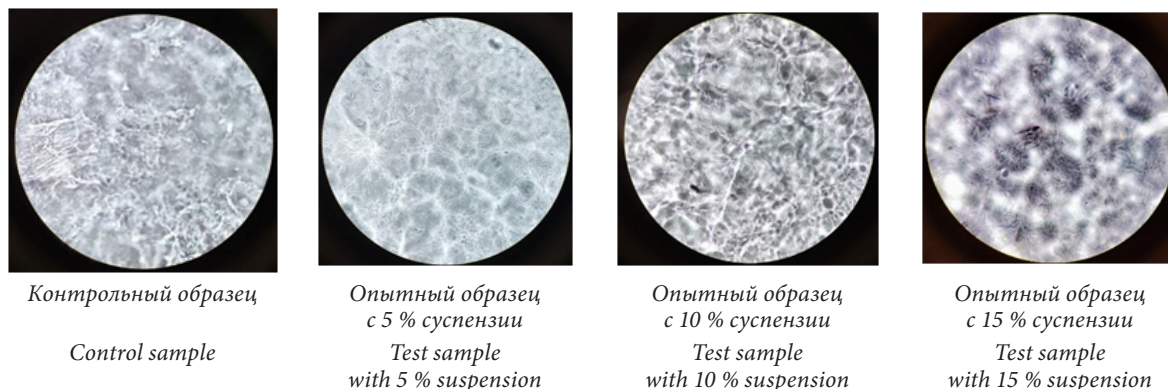


Рис. 2. Микроструктура образцов пленок
Fig. 2. Microstructure of film samples

Таблица 1
Механические свойства пленок

Показатель	Значение показателя			
	Контрольный образец	Опытный образец с 5 % суспензии	Опытный образец с 10 % суспензии	Опытный образец с 15 % суспензии
Предел прочности, МПа	9,71 ± 0,81	6,68 ± 0,55	5,02 ± 0,32	3,35 ± 0,29
Относительное удлинение, %	49,8 ± 3,1	52,0 ± 4,27	54,9 ± 0,1	45,8 ± 1,9
Толщина, мм	0,13 ± 0,01	0,09 ± 0,01	0,08 ± 0,01	0,15 ± 0,01

Table 1
Mechanical properties of films

Indicator	Value			
	Control sample	Test sample with 5 % suspension	Test sample with 10 % suspension	Test sample with 15 % suspension
Tensile strength, MPa	9.71 ± 0.81	6.68 ± 0.55	5.02 ± 0.32	3.35 ± 0.29
Relative elongation, %	49.8 ± 3.1	52.0 ± 4.27	54.9 ± 0.1	45.8 ± 1.9
Thickness, mm	0.13 ± 0.01	0.09 ± 0.01	0.08 ± 0.01	0.15 ± 0.01

Исследование паропроницаемости пленок проводили следующим образом. Поверх предварительно взвешенных стеклянных бюкс диаметром 1,8 см с силикагелем на уровне 3–4 мм до края помещали вырезанные образцы пленок диаметром 2 см. Бюксы с образцами помещали в эксикатор при постоянной температуре 20 °С.

Результаты определения механических свойств композитных пленок (таблица 1) показали, что с добавлением в биокомпозит суспензии КМЦ и гидролизата белка снижается значение предела прочности пленки и незначительно повышается ее эластичность у образцов с 5 и 10 % суспензии.

Данные разных ученых относительно механических характеристик пленок с включением КМЦ отличаются: одни показали эффективность включения КМЦ в состав биокомпозитов для получения биоразлагаемых пленок с высокой механической прочностью [19], другие опытным путем доказа-

ли, что пленки с КМЦ имеют низкие механические свойства по сравнению с пленками на основе целлюлозы [21]. Видимо, формируемые химические связи между КМЦ и структурообразователем биокомпозита оказывают существенное влияние на механические свойства получаемых пленочных материалов. Так, например, результаты исследований Л. Н. Студеникиной показали, что прочностные показатели пленок снижаются пропорционально повышению содержания микроцеллюлозы в биокомпозите, при этом минимальное значение достигало 5 МПа. Также установлено, что с увеличением содержания микроцеллюлозы повышалось влагопоглощение, в чем автор отмечает положительный эффект на биоразлагаемость – она будет повышаться [22]. Как показали результаты данных исследований, полисахарид агар с добавлением суспензии КМЦ не образует прочные связи в структуре пленки, но при этом они становятся более эластичными.

Таблица 2
Функциональные свойства пленок

Показатель	Значение показателя			
	Контрольный образец	Опытный образец с 5 % суспензии	Опытный образец с 10 % суспензии	Опытный образец с 15 % суспензии
Растворимость в воде, %	61,56 ± 2,55	59,61 ± 1,81	56,17 ± 1,65	40,43 ± 1,30
Паропроницаемость, г/м ²	185 ± 5,8	226 ± 6,5	231 ± 6,1	298 ± 7,2
Влагопоглощение, %	17,8 ± 0,55	20,1 ± 0,48	21,0 ± 0,50	22,6 ± 0,45
Антирадикальная активность DPPH, %	57,65 ± 2,81	61,45 ± 2,50	62,51 ± 1,95	63,81 ± 2,10
Содержание фенолов, мг-экв галловой кислоты на 1 г	0,253 ± 0,03	0,343 ± 0,04	0,502 ± 0,05	0,410 ± 0,05

Table 2
Functional properties of films

Indicator	Value			
	Control sample	Test sample with 5 % suspension	Test sample with 10 % suspension	Test sample with 15 % suspension
<i>Solubility in water, %</i>	61,56 ± 2,55	59,61 ± 1,81	56,17 ± 1,65	40,43 ± 1,30
<i>Vapor permeability, g/m²</i>	185 ± 5,8	226 ± 6,5	231 ± 6,1	298 ± 7,2
<i>Moisture absorption, %</i>	17,8 ± 0,55	20,1 ± 0,48	21,0 ± 0,50	22,6 ± 0,45
<i>Antiradical activity of DPPH, %</i>	57,65 ± 2,81	61,45 ± 2,50	62,51 ± 1,95	63,81 ± 2,10
<i>Phenol content, mg-eq of gallic acid / 1 g</i>	0,253 ± 0,03	0,343 ± 0,04	0,502 ± 0,05	0,410 ± 0,05

Результаты исследований функциональных свойств пленок, представленные в таблице 2, также неоднозначны. С одной стороны, при добавлении суспензии КМЦ и белкового гидролизата в состав биокомпозита пленки ее антиоксидантные свойства повышаются. С другой стороны, повышение паропроницаемости и влагопоглощения может привести к быстрой порче продуктов с высокой влажностью. Снижение растворимости пленок при увеличении содержания суспензии является положительным эффектом для хранения продуктов питания с высокой влажностью. С учетом установленных свойств требуется подтверждение активных свойств пленки на реальных объектах в виде конкретных видов пищевых продуктов с разной влажностью.

Обсуждение и выводы (Discussion and Conclusion)

Предложенные технологические подходы позволяют получить биоразлагаемые пленки на основе полисахарида агара с включением белковых гидролизатов в составе суспензии КМЦ, рекомендованные для упаковки пищевых продуктов. Результаты исследований функциональных и механических свойств разработанных пленок показали, что используемые активные добавки оказывают неоднозначное влияние на анализируемые характеристики. Экспериментально установлено, что введение суспензии КМЦ привело к снижению предела механической прочности биокомпозитной пленки при одновременном повышении ее растяжимости и эластичности. Полученные результаты экспериментально позволили доказать, что формируемые хи-

мические связи между полисахаридом и волокнами целлюлозы отличаются оптимальной гибкостью, но невысокой прочностью, что ограничивает направления использования данных пленок в пищевой промышленности.

При анализе гидроколлоидных свойств композитных пленок, полученных на основе агара с добавлением композита белкового гидролизата и КМЦ в виде суспензии, отмечено повышение паропроницаемости и влагопоглощения, что характеризует высокую биоразлагаемость материала, способность к быстрому образованию биогумуса при разложении этой пленки в окружающей среде. Однако высокая влагопоглощающая способность упаковочных материалов является фактором риска, создает благоприятные условия для развития микроорганизмов и может привести к порче хранящейся в таких пленках продукции. Отмечено, что колебания влагопоглощающей способности и паропроницаемости были в пределах значений, описанных другими исследователями для пленок на основе натуральных биополимеров [23].

Получены положительные результаты введения в состав агара суспензии из КМЦ и белкового гидролизата при исследовании показателей антиоксидантной активности, что доказывает потенциал исследуемых пленок для снижения окислительной порчи продуктов питания, но требует дополнительных исследований на конкретных объектах в виде пищевых продуктов с разной влажностью.

Полученные результаты согласуются с результатами многих ученых, которые также экспериментально подтвердили высокие антиоксидантные и антимикробные свойства бионанокompозитов в упаковке пищевых продуктов благодаря формированию стабильной химической структуры, способной удерживать активные частицы вводимых в состав биоактивных соединений. В данном исследовании активным компонентом являлся гидролизат белка, в составе которого в ранее проведенных

исследованиях выявлено присутствие биоактивных пептидов, которые эффективно удерживаются в матрице КМЦ. Однако, как показали результаты исследований, структура агар – КМЦ оказалась механически менее прочной, чем однокомпонентный состав на агаре.

Благодарности (Acknowledgements)

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, номер проекта 23-26-00153.

Библиографический список

1. Nandi S., Guha P. Development, characterization and application of starch-based film containing polyphenols of piper betle L. waste in chicken meat storage // *Food Chemistry*. 2024. Vol. 431. Article number 137103. DOI: 10.1016/j.foodchem.2023.137103.
2. Mao S., Li F., Zhou X., Lu C., Zhang T. Characterization and sustained release study of starch-based films loaded with carvacrol: A promising UV-shielding and bioactive nanocomposite film // *LWT*. 2023. Vol. 180. Article number 114719. DOI: 10.1016/j.lwt.2023.114719.
3. Mouhoub A., Guendouz A., El Alaoui-Talibi Z., Koraichi S. I., Delattre C., El Modafar C. Evaluation of different characteristics and bioactivities of chitosan-based films incorporating *Eugenia caryophyllus* and *Cinnamomum zeylanicum* essential oils // *Materials Chemistry and Physics*. 2023. Vol. 307. Article number 128201. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2023.128201.
4. Zhao Q., Fan L., J Li., Zhon S. Pickering emulsions stabilized by biopolymer-based nanoparticles or hybrid particles for the development of food packaging films: A review // *Food Hydrocolloids*. 2024. Vol. 146. Part A. Article number 109185. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2023.109185.
5. Beji E., Keshk Sherif M. A. S., Douiri S., Charradi K., Hassen R. B., Gtari M., Attia H., Ghorbel D. Bioactive film based on chitosan incorporated with cellulose and aluminum chloride for food packaging application: Fabrication and characterization // *Food Bioscience*. 2023. Vol. 53. Article number 102678. DOI: 10.1016/j.fbio.2023.102678.
6. Huan Y., Zhang S., Vardhanabhuti B. Influence of the molecular weight of carboxymethylcellulose on properties and stability of whey protein-stabilized oil-in-water emulsions // *Journal of Dairy Science*. 2016. Vol. 99. Iss. 5. Pp. 3305–3315. DOI: 10.3168/jds.2015-10278.
7. Harish Pandian J., Senthilkumar K., Venkata Ratnam M., Naveenkumar M., Samraj S. Azadirachta indica leaf extract mediated silver nanoparticles impregnated nano composite film (AgNP/MCC/starch/whey protein) for food packaging applications // *Environmental Research*. 2023. Vol. 216. Part 2. Article number 114641. DOI:10.1016/j.envres.2022.114641.
8. Rahman W. A., Ismail A. S., Majid N. A. Preparation and characterization of biocomposite film derived from microcrystalline cellulose (MCC) of jackfruit rind waste // *Materials Today: Proceedings*. 2022. Vol. 66. Part 10. Pp. 4055–4060. DOI:10.1016/j.matpr.2022.06.071.
9. Bangar S. P., Esua O. J., Nickhil C., Whiteside W. S. Microcrystalline cellulose for active food packaging applications: A review // *Food Packaging and Shelf Life*. 2023. Vol. 36. Article number 101048. DOI: 10.1016/j.fpsl.2023.101048.
10. Hamdan M. A., Ramli N. A., Othman N. A., Amin K. N. M., Adam F. Characterization and property investigation of microcrystalline cellulose (MCC) and carboxymethyl cellulose (CMC) filler on the carrageenan-based biocomposite film // *Materials Today: Proceedings*. 2021. Vol. 42. Part 1. Pp. 56–62. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.09.304.
11. Chen Q., Shi Y., Chen G., Cai M. Enhanced mechanical and hydrophobic properties of composite cassava starch films with stearic acid modified MCC (microcrystalline cellulose)/NCC (nanocellulose) as strength agent // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2020. Vol. 142. Pp. 846–854. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2019.10.024.
12. Debnath B., Duarah P., Haldar D., Purkait Mihir K. Improving the properties of corn starch films for application as packaging material via reinforcement with microcrystalline cellulose synthesized from elephant grass // *Food Packaging and Shelf Life*. 2022. Vol. 34. Article number 100937. DOI:10.1016/j.fpsl.2022.100937.
13. Pires J. R. A., Souza V. G. L., Gomes L. A., Coelho I. M., Godinho M. H., Fernando A. L. Micro and nanocellulose extracted from energy crops as reinforcement agents in chitosan films // *Industrial Crops and Products*. 2022. Vol. 186. Article number 115247. DOI: 10.1016/j.indcrop.2022.115247.

14. Morais da Silva H., Mageste A. B., Barros e Silva S. J., Ferreira Guilherme M. D., Ferreira Gabriel M. D. Anthocyanin immobilization in carboxymethylcellulose/starch films: A sustainable sensor for the detection of Al(III) ions in aqueous matrices // *Carbohydrate Polymers*. 2020. Vol. 230. Article number 115679. DOI: 10.1016/j.carbpol.2019.115679.
15. Inphonlek S., Sunintaboon P., Leonard M., Durand A. Chitosan/carboxymethylcellulose-stabilized poly(lactide-co-glycolide) particles as bio-based drug delivery carriers // *Carbohydrate Polymers*. 2020. Vol. 242. Article number 116417. DOI: 10.1016/j.carbpol.2020.116417.
16. Yu C., Shan J., Ju H., Chen X., Xu G., Wu Y. Construction of a Ternary Composite Colloidal Structure of Zein/Soy Protein Isolate/Sodium Carboxymethyl Cellulose to Deliver Curcumin and Improve Its Bioavailability // *Foods*. 2023. Vol. 12. Article number 2692. DOI: 10.3390/foods12142692.
17. Priyadarshi R., Kumar B., Rhim J. W. Green and facile synthesis of carboxymethylcellulose/ZnO nanocomposite hydrogels crosslinked with Zn²⁺ ions // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2020. Vol. 162. Pp. 229–235. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2020.06.155.
18. Ćorković I., Pichler A., Buljeta I., Šimunović J., Kopjar M. Carboxymethylcellulose hydrogels: Effect of its different amount on preservation of tart cherry anthocyanins and polyphenols // *Current Plant Biology*. 2021. Vol. 28. Article number 100222. DOI: 10.1016/j.cpb.2021.100222.
19. Fernández-Santos J., Valls C., Cusola O., Roncero M. B. Composites of cellulose nanocrystals in combination with either cellulose nanofibril or carboxymethylcellulose as functional packaging films // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2022. Vol. 211. Pp. 218–229. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2022.05.049.
20. Farhan A., Hani N. M. Characterization of edible packaging films based on semi-refined kappa-carrageenan plasticized with glycerol and sorbitol // *Food Hydrocolloids*. 2017. No. 64. Pp. 48–58. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2016.10.034.
21. Kim H.-J., Roy S., Rhim J.-W. Effects of various types of cellulose nanofibers on the physical properties of the CNF-based films // *Journal of Environmental Chemical Engineering* 2021. Vol. 9 (5). Article number 106043. DOI: 10.1016/j.jece.2021.106043.
22. Студеникина Л. Н. Перспективы разработки биоразлагаемого композита на основе поливинилового спирта и микроцеллюлозы // *Модели и технологии природообустройства (региональный аспект)*. 2019. № 2 (9). С. 31–35.
23. Дышлок Л. С., Просеков А. Ю., Асякина Л. К. Изучение свойств биоразлагаемых пленок из природных полисахаридов // *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология*. 2019. Т. 9. № 4. С. 703–711. DOI: 10.21285/2227-2925-2019-9-4-703-711.

Об авторах:

Оксана Владимировна Зинина^{1, 2}, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры «Пищевые и биотехнологии»¹, доцент кафедры биотехнологии и пищевых продуктов², ORCID 0000-0003-3729-1692, AuthorID 654624; +7 906 871-36-81, zininaov@susu.ru

Елена Александровна Вишнякова¹, лаборант-исследователь УНИД, ORCID 0000-0002-8557-9239, AuthorID 1152986; +7 912 772-15-61, l_vishny@mail.ru

Светлана Павловна Меренкова¹, кандидат ветеринарных наук, доцент кафедры «Пищевые и биотехнологии», ORCID 0000-0002-8795-1065, AuthorID 668876; +7 951 813-70-62, merenkovasp@susu.ru

Ольга Петровна Неверова², кандидат биологических наук, заведующая кафедрой биотехнологии и пищевых продуктов, ORCID 0000-0002-2474-2290, AuthorID 393632; +7 912 634-94-62, opneverova@mail.ru

¹ Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), Челябинск, Россия

² Уральский государственный аграрный университет, Екатеринбург, Россия

References

1. Nandi S., Guha P. Development, characterization and application of starch-based film containing polyphenols of piper beetle L. waste in chicken meat storage // *Food Chemistry*. 2024. Vol. 431. Article number 137103. DOI: 10.1016/j.foodchem.2023.137103.
2. Mao S., Li F., Zhou X., Lu C., Zhang T. Characterization and sustained release study of starch-based films loaded with carvacrol: A promising UV-shielding and bioactive nanocomposite film // *LWT*. 2023. Vol. 180. Article number 114719. DOI: 10.1016/j.lwt.2023.114719.
3. Mouhoub A., Guendouz A., El Alaoui-Talibi Z., Koraichi S. I., Delattre C., El Modafar C. Evaluation of different characteristics and bioactivities of chitosan-based films incorporating *Eugenia caryophyllus* and *Cinnamomum zeylanicum* essential oils // *Materials Chemistry and Physics*. 2023. Vol. 307. Article number 128201. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2023.128201.

4. Zhao Q., Fan L., J Li., Zhon S. Pickering emulsions stabilized by biopolymer-based nanoparticles or hybrid particles for the development of food packaging films: A review // *Food Hydrocolloids*. 2024. Vol. 146. Part A. Article number 109185. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2023.109185.
5. Beji E., Keshk Sherif M. A. S., Douiri S., Charradi K., Hassen R. B., Gtari M., Attia H., Ghorbel D. Bioactive film based on chitosan incorporated with cellulose and aluminum chloride for food packaging application: Fabrication and characterization // *Food Bioscience*. 2023. Vol. 53. Article number 102678. DOI: 10.1016/j.fbio.2023.102678.
6. Huan Y., Zhang S., Vardhanabhuti B. Influence of the molecular weight of carboxymethylcellulose on properties and stability of whey protein-stabilized oil-in-water emulsions // *Journal of Dairy Science*. 2016. Vol. 99. Iss. 5. Pp. 3305–3315. DOI: 10.3168/jds.2015-10278.
7. Harish Pandian J., Senthilkumar K., Venkata Ratnam M., Naveenkumar M., Samraj S. Azadirachta indica leaf extract mediated silver nanoparticles impregnated nano composite film (AgNP/MCC/starch/whey protein) for food packaging applications // *Environmental Research*. 2023. Vol. 216. Part 2. Article number 114641. DOI:10.1016/j.envres.2022.114641.
8. Rahman W. A., Ismail A. S., Majid N. A. Preparation and characterization of biocomposite film derived from microcrystalline cellulose (MCC) of jackfruit rind waste // *Materials Today: Proceedings*. 2022. Vol. 66. Part 10. Pp. 4055–4060. DOI:10.1016/j.matpr.2022.06.071.
9. Bangar S. P., Esua O. J., Nickhil C., Whiteside W. S. Microcrystalline cellulose for active food packaging applications: A review // *Food Packaging and Shelf Life*. 2023. Vol. 36. Article number 101048. DOI: 10.1016/j.fpsl.2023.101048.
10. Hamdan M. A., Ramli N. A., Othman N. A., Amin K. N. M., Adam F. Characterization and property investigation of microcrystalline cellulose (MCC) and carboxymethyl cellulose (CMC) filler on the carrageenan-based biocomposite film // *Materials Today: Proceedings*. 2021. Vol. 42. Part 1. Pp. 56–62. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.09.304.
11. Chen Q., Shi Y., Chen G., Cai M. Enhanced mechanical and hydrophobic properties of composite cassava starch films with stearic acid modified MCC (microcrystalline cellulose)/NCC (nanocellulose) as strength agent // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2020. Vol. 142. Pp. 846–854. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2019.10.024.
12. Debnath B., Duarah P., Haldar D., Purkait Mihir K. Improving the properties of corn starch films for application as packaging material via reinforcement with microcrystalline cellulose synthesized from elephant grass // *Food Packaging and Shelf Life*. 2022. Vol. 34. Article number 100937. DOI:10.1016/j.fpsl.2022.100937.
13. Pires J. R. A., Souza V. G. L., Gomes L. A., Coelho I. M., Godinho M. H., Fernando A. L. Micro and nanocellulose extracted from energy crops as reinforcement agents in chitosan films // *Industrial Crops and Products*. 2022. Vol. 186. Article number 115247. DOI: 10.1016/j.indcrop.2022.115247.
14. Morais da Silva H., Mageste A. B., Barros e Silva S. J., Ferreira Guilherme M. D., Ferreira Gabriel M. D. Anthocyanin immobilization in carboxymethylcellulose/starch films: A sustainable sensor for the detection of Al(III) ions in aqueous matrices // *Carbohydrate Polymers*. 2020. Vol. 230. Article number 115679. DOI: 10.1016/j.carbpol.2019.115679.
15. Inphonlek S., Sunintaboon P., Leonard M., Durand A. Chitosan/carboxymethylcellulose-stabilized poly(lactide-co-glycolide) particles as bio-based drug delivery carriers // *Carbohydrate Polymers*. 2020. Vol. 242. Article number 116417. DOI: 10.1016/j.carbpol.2020.116417.
16. Yu C., Shan J., Ju H., Chen X., Xu G., Wu Y. Construction of a Ternary Composite Colloidal Structure of Zein/Soy Protein Isolate/Sodium Carboxymethyl Cellulose to Deliver Curcumin and Improve Its Bioavailability // *Foods*. 2023. Vol. 12. Article number 2692. DOI: 10.3390/foods12142692.
17. Priyadarshi R., Kumar B., Rhim J. W. Green and facile synthesis of carboxymethylcellulose/ZnO nanocomposite hydrogels crosslinked with Zn²⁺ ions // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2020. Vol. 162. Pp. 229–235. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2020.06.155.
18. Ćorković I., Pichler A., Buljeta I., Šimunović J., Kopjar M. Carboxymethylcellulose hydrogels: Effect of its different amount on preservation of tart cherry anthocyanins and polyphenols // *Current Plant Biology*. 2021. Vol. 28. Article number 100222. DOI: 10.1016/j.cpb.2021.100222.
19. Fernández-Santos J., Valls C., Cusola O., Roncero M. B. Composites of cellulose nanocrystals in combination with either cellulose nanofibril or carboxymethylcellulose as functional packaging films // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2022. Vol. 211. Pp. 218–229. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2022.05.049.
20. Farhan A., Hani N. M. Characterization of edible packaging films based on semi-refined kappa-carrageenan plasticized with glycerol and sorbitol // *Food Hydrocolloids*. 2017. No. 64. Pp. 48–58. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2016.10.034.

21. Kim H.-J., Roy S., Rhim J.-W. Effects of various types of cellulose nanofibers on the physical properties of the CNF-based films // Journal of Environmental Chemical Engineering 2021. Vol. 9 (5). Article number 106043. DOI: 10.1016/j.jece.2021.106043.
22. Studenikina L. N. Perspektivy razrabotki biorazлагаемого kompozita na osnove polivinilovogo spirta i mikrotsellyulozy [Prospects of development of biodegradable composite based on polyvinyl alcohol and microcellulose] // Modeli i tekhnologii prirodoobustroystva (regional'nyy aspekt). 2019. No. 2 (9). Pp. 31–35. (In Russian.)
23. Dyshlyuk L. S., Prosekov A. Yu., Asyakina L. K. Izuchenie svoystv biorazлагаemykh plenok iz prirodnykh polisakharidov [Property study of natural polysaccharide biodegradable films] // Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya. Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology. 2019. No. 9 (4). Pp. 703–711. (In Russian.)

Authors' information:

Oksana V. Zinina^{1, 2}, candidate of agricultural sciences, associate professor of the department of food and biotechnology¹, associate professor of the department of biotechnology and food products²,

ORCID 0000-0003-3729-1692, AuthorID 654624; +7 906 871-36-81, zininaov@susu.ru

Elena A. Vishnyakova¹, research laboratory assistant at the department of scientific and innovative activities, ORCID 0000-0002-8557-9239, AuthorID 1152986; +7 912 772-15-61, l_vishny@mail.ru

Svetlana P. Merenkova, candidate of veterinary sciences, associate professor of the department of food and biotechnology, ORCID 0000-0002-8795-1065, AuthorID 668876; +7 951 813-70-62, merenkovasp@susu.ru

Olga P. Neverova², candidate of biological sciences, head of the department of biotechnology and food products, ORCID 0000-0002-2474-2290, AuthorID 393632; +7 912 634-94-62, opneverova@mail.ru

¹South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia

²Ural State Agrarian University, Ekaterinburg, Russia