

БИОРАЗЛАГАЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ КОМПОЗИЦИИ КРАХМАЛА И ХИТОЗАНА: ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА

А.В. Малинин¹, artemmalinin3@gmail.com

А.В. Цатуров¹, aram-chel@mail.ru

А.В. Игнатова¹, ignatovaav@susu.ru

Ш. Соनावайн², shirish@nitw.ac.in

¹ Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

² Национальный технологический институт, Варангал, шт. Телангана, Индия

Аннотация. Использование полисахаридов для получения органической упаковки открывают новые возможности эффективного использования продовольственного сырья для решения экологических проблем. Органическая упаковка по мере известности становится все более привлекательной для населения, заинтересованного в создании экологически благоприятных условий проживания. Основным определяющим фактором, обеспечивающим достижение результата, является способность экоматериалов и изделий из них в короткие сроки подвергаться процессу деградации в компосте на безопасные вещества, такие как биомасса, вода, углекислый газ. Во всем мире научными коллективами ведутся исследования по получению биоразлагаемых материалов, способных в полном объеме заменить пластик. Наиболее перспективными в этом ряду исследований сырьевыми компонентами для формирования матрицы являются крахмалы, хитозан. Данные компоненты, имея различную природу, обладая разными свойствами, могут формировать интересную в технологическом аспекте композицию. Целью данного исследования является определение оптимального соотношения основных ингредиентов картофельного крахмала и хитозана и исследование характеристик пленочного материала для выявления лучших параметров. Для достижения поставленной цели в рамках исследования были приготовлены 4 образца биоразлагаемых пленок, которые оценивались по комплексу показателей с учетом оценки структурно-механических характеристик материала. Установлено, что все образцы обладали эластичностью, имели однородные без дефектов поверхности. В ходе обработки экспериментальных данных наилучшие показатели по прочности и водопоглощению были у образцов на основе следующего процентного соотношения компонентов: картофельный крахмал – 1,0 % и хитозан – 1,5 %. В то же время по результатам оценки миграции компонентов в симуляторы в пищевые системы определены образцы состава: картофельный крахмал 1,0 % и хитозан 0,5 %. Доказано, что разработанные биоразлагаемые пленки могут быть использованы в качестве упаковки, изделий с короткими сроками хранения в качестве альтернативы полимерным пленкам на основе термопластов.

Ключевые слова: биоразлагаемый материал, картофельный крахмал, хитозан, упаковка

Благодарности. Исследования выполнены при финансовой поддержке программы стратегического лидерства «Приоритет-2030» СПЗ, в рамках реализации подпроекта «Биоразлагаемые экоматериалы».

Для цитирования: Биоразлагаемые материалы на основе композиции крахмала и хитозана: эксплуатационные свойства / А.В. Малинин, А.В. Цатуров, А.В. Игнатова, Ш. Соनावайн // Вестник ЮУрГУ. Серия «Пищевые и биотехнологии». 2023. Т. 11, № 2. С. 33–40. DOI: 10.14529/food230204

Original article
DOI: 10.14529/food230204

BIODEGRADABLE MATERIALS BASED ON STARCH AND CHITOSAN COMPOSITION: OPERATIONAL PROPERTIES

A. V. Malinin¹, artemmalinin3@gmail.com

A. V. Tsaturov¹, aram-chel@mail.ru

A. V. Ignatova¹, ignatovaav@susu.ru

Sh. Sonawane², shirish@nitw.ac.in

¹ South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

² National Institute of Technology, Telangana State, India

Abstract. The use of polysaccharides to produce organic packaging opens up new opportunities for the effective use of food raw materials to solve environmental problems. Organic packaging is becoming more and more attractive to the population interested in creating environmentally friendly living conditions. The main determining factor ensuring the achievement of the result is the ability of ecomaterials and products made from them to undergo a degradation process in compost in a short time for safe substances such as biomass, water, carbon dioxide. All over the world, research teams are conducting research to obtain biodegradable materials that can fully replace plastic. The most promising raw materials for matrix formation in this series of studies are starches, chitosan. These components, having a different nature, having different properties, can form an interesting composition in the technological aspect. The purpose of this study is to determine the optimal ratio of the main ingredients of potato starch and chitosan and to study the characteristics of the film material to identify the best parameters. To achieve this goal, 4 samples of biodegradable films were prepared within the framework of the study, which were evaluated according to a set of indicators, taking into account the assessment of the structural and mechanical characteristics of the material. It was found that all samples had elasticity, had homogeneous surfaces without defects. During the processing of experimental data, the samples had the best strength and water absorption indicators based on the following percentage of components: potato starch – 1.0 % and chitosan – 1.5 %. At the same time, according to the results of the assessment of the migration of simulators into food systems, samples of the composition were determined: potato starch 1.0 % and chitosan 0.5 %. It is proved that the developed biodegradable films can be used as packaging, products with short shelf life as an alternative to polymer films based on thermoplastics.

Keywords: biodegradable material, potato starch, chitosan, packaging

Acknowledgments. The research was carried out with the financial support of the strategic leadership program «Priority-2030» SP3, as part of the implementation of the subproject «Biodegradable eco-materials».

For citation: Malinin A.V., Tsaturov A.V., Ignatova A.V., Sonawane Sh. Biodegradable materials based on starch and chitosan composition: operational properties. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Food and Biotechnology*, 2023, vol. 11, no. 2, pp. 33–40. (In Russ.) DOI: 10.14529/food230204

Введение

На сегодняшний день ученые во всем мире занимаются поиском решения проблем, связанных с накоплением и утилизацией полимерных отходов, имеющих длительный период разложения в окружающей среде. Одним из способов решения данной проблемы могут стать биоразлагаемые материалы, полученные на основе органического сырья. Биоразлагаемые материалы могут подвергаться деструк-

ции под действием микроорганизмов до конечных продуктов: воды, остаточной биомассы и углекислого газа, не нанося вреда окружающей среде. Предлагаемые в настоящее время технологии используют в составе сырьевых компонентов наполнители, пластификаторы, сопутствующие добавки и растворители. Для формирования высоких характеристик материала устанавливается оптимальное соотношение ингредиентов, их концентрации.

В качестве основного сырья для получения биоразлагаемого материала используются крахмалы, пектины, целлюлоза, хитозан и т. д. Наиболее широкое применение в данном направлении находят крахмалы и хитозан [3, 4].

Крахмал – это полимерный углевод, состоящий из многочисленных глюкозных звеньев, соединенных гликозидными связями. Крахмал получают из растительного сырья, такого как картофель, кукуруза, тапиок и т. д. Для получения биоразлагаемой пленки используют наиболее часто пластифицированный картофельный крахмал. Крахмал картофельный имеет гранулы размером от 2 до 150 мкм разных форм. При тепловом воздействии в водной фазе гранулы крахмала набухают, далее следуют процессы клейстеризации, таким образом, амилоза переходит в клейстер, образуя при этом трехмерные сетки. Процессы набухания и клейстеризации крахмала сопровождаются изменением вязкости раствора. Картофельный крахмал набухает лучше по сравнению крахмалами из зернового сырья, что благоприятно влияет на формирование матрицы материала. Кристаллическая упорядоченность гранул крахмала часто является основным фактором, влияющим на функциональные свойства крахмала. Процесс желатинизации крахмала при производстве биоразлагаемых материалов включает набухание гранул крахмала, плавление кристаллической структуры, потерю оптического двойного лучепреломления, расплавление и диссоциацию двойных спиралей [2].

Хитозан – это аминсахар, производное линейного полисахарида, макромолекулы состоят из случайно связанных β -(1-4) D-глюкозаминовых звеньев и N-ацетил-D-глюкозамин. Хитозан получают из хитина из панцирей красноногих крабов или из низших грибов путём удаления ацила. Хитозан растворяется в разбавленных растворах органических кислот, но нерастворим в высоких концентрациях ионов водорода при pH 6,5 и осаждается в виде гелеобразного соединения. Хитозан положительно заряжен аминными группами, что делает его пригодным для связывания с отрицательно заряженными молекулами. Хитозан обладает противомикробным и антиоксидантным действием. В последние годы уделяется значительное внимание использованию хитозана в виде пленок и съедобных покрытий для увеличения срока

хранения и сохраняемости качества овощей и фруктов [1, 11].

Получение биоразлагаемых материалов на основе крахмала картофельного и хитозана позволит получить широкий ассортимент изделий, пленок для разных сфер применения.

Целью данного исследования является получение образцов пленочного материала при различном соотношении основных сырьевых компонентов (крахмала картофельного и хитозана) и изучение эксплуатационных характеристик готового пленочного материала.

Объекты и методы исследования

Объектами исследования являлись биоразлагаемые пленки, полученные при различном соотношении растительных компонентов. В качестве основного сырья были использованы картофельный крахмал (далее КК) (ГОСТ Р. 53876-2010) и хитозан (далее Х).

Работы выстраивались в определенной последовательности: формирование рецептурного состава, получение пленочных материалов и оценка эксплуатационных свойств.

Для определения оптимального соотношения основного сырья и технологических этапов были получены опытные образцы в вариации соотношений КК:Х. Образец 1 – 1,0:0,5; образец 2 – 1,0:1,0; образец 3 – 2,0:0,5; образец 4 – 2,0:1,0. В качестве пластификатора использовался глицерин, в качестве сопутствующей добавки применяли поливиниловый спирт. Внешний вид полученных образцов биоразлагаемого пленочного материала представлен на рис. 1.

Для исследования эксплуатационных свойств образцов пленочного биоразлагаемого материала были определены следующие показатели:

- деформационно-механические показатели и толщина;
- водопоглощение;
- миграция в пищевые имитаторы.

Определение деформационно-механических показателей пленок. Деформационно-механические характеристики полученных образцов оцениваются с помощью разрывной машины Instron 5942. Исследование проводилось в соответствии с нормативной документацией ASTM-D-882-91 [5].

Определение толщины пленок. Толщину пленки измеряли с помощью механического микрометра «ТОРЕХ 31с629». Для каждого образца выполняли не менее трех измерений.

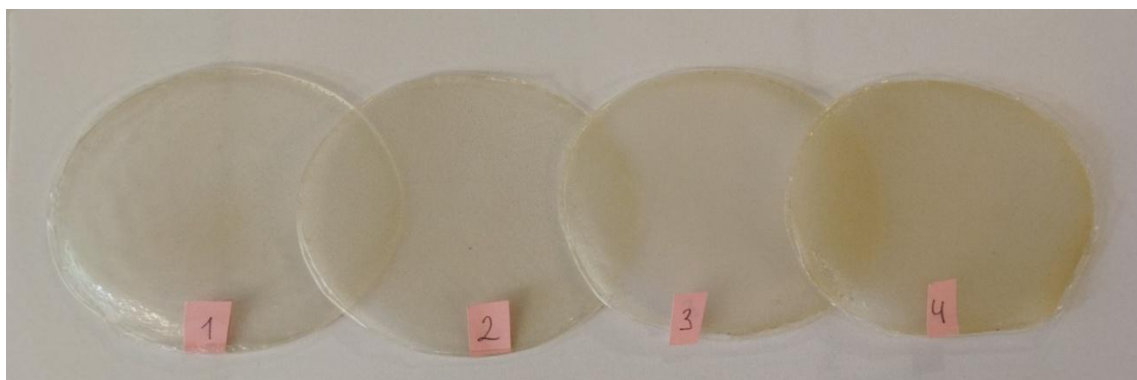


Рис. 1. Внешний вид образцов биоразлагаемых пленок, полученных при различном соотношении основного сырья (К:Х): 1 – образец 1; 2 – образец 2; 3 – образец 3; 4 – образец 4

Затем вычисляли среднее арифметическое значение толщины пленки.

Определение водопоглощения пленки. Исследование водопоглощения материала проводилось при температуре 23 °С и в кипящей воде (по ГОСТ 4650-2014. «Пластмассы. Методы определения водопоглощения»). Предварительно подготовленные образцы пленки в форме диска диаметром (50 ± 1) мм и толщиной ($3,0 \pm 0,2$) мм сушили в сушильном шкафу при температуре (50 ± 2)°С в течение не менее 24 ч. Далее образцы материала охлаждали до температуры окружающей среды в эксикаторе и взвешивали, записывая результат измерения в миллиграммах с точностью до первого десятичного знака. Испытуемые образцы материала погружали в дистиллированную воду при температуре (23 ± 2) °С и инкубировали 24; 48; 96 часов или в кипящую дистиллированную воду в течение 30 мин. После выдержки в воде в течение заданного времени и условий проведения исследования извлекали испытуемые образцы из воды, удаляли воду с поверхности образцов фильтровальной бумагой и в течение не более 1 мин после извлечения образцов из воды взвешивали их с точностью до 0,1 мг. Массу воды, поглощенную каждым испытуемым образцом, определяли по разности между массой образца до и после инкубации, выраженной в процентах по отношению к начальной массе.

Определение миграции в имитаторы пищевых систем. Миграционные исследования проводились в соответствии с действующим законодательством. Выбранными имитаторами были: имитатор А, этанол (10 % в/в, имитирующий гидрофильные пищевые продук-

ты); имитатор В, уксусная кислота (3 % в/в, имитирующий кислые пищевые продукты); и имитатор С, изооктан (имитирующий липофильные пищевые продукты со свободными жирами на поверхности). Образцы пленки погружали в 9 мл имитаторов с контактным соотношением 6 дм² пленки на кг имитатора. Исследуемые образцы оставляли в контакте с имитаторами пищевых продуктов в течение 7 дней при 20 °С, после чего образцы были изъятые, высушены и взвешены. Миграция в пищевые симуляторы рассчитывалась как разница между начальной и конечной массой в мг высвобождаемых компонентов пленки/дм² и контактной поверхности. Исследование проводилось в трех измерениях.

Результаты и их обсуждение

На первом этапе исследования оценивались деформационно-механические показатели и толщина исследуемого материала. Механические характеристики материалов определяют их применимость и перспективность. Принципиальные особенности полимерного состояния вещества определяют ряд характерных черт механических свойств материала: способность к большим обратимым деформациям, релаксационный характер деформации, способность приобретать анизотропию свойств и сохранять её при прекращении воздействия. Механические свойства материала можно разделить на прочностные свойства и деформационные свойства. Толщина материала полностью зависит от его предназначения. График предела прочности образцов биоразлагаемых пленок представлен на рис. 2. График деформации в момент разрыва образцов биоразлагаемых пленок – на рис. 3.

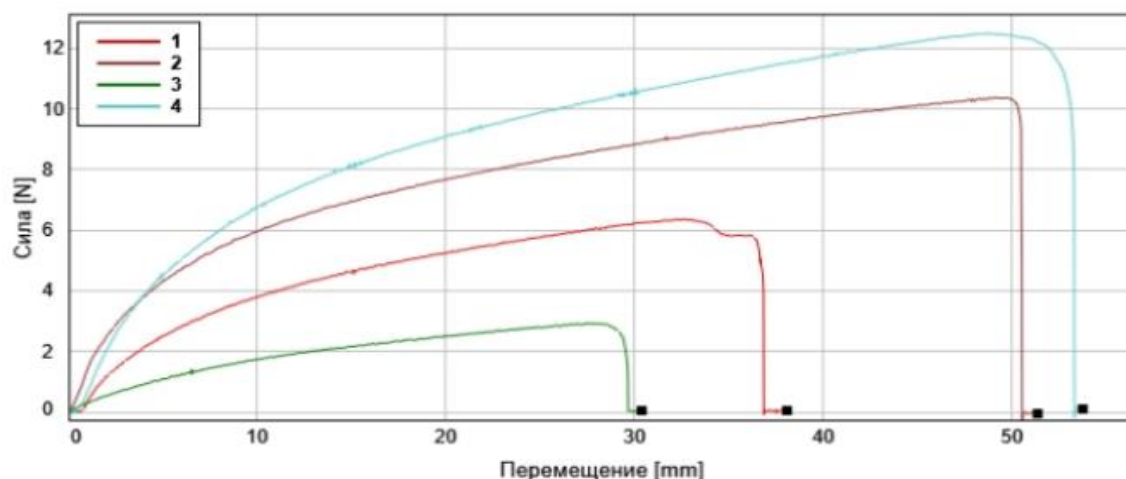


Рис. 2. Предел прочности образцов биоразлагаемых пленок, МПа:
1 – образец 1; 2 – образец 2; 3 – образец 3; 4 – образец 4

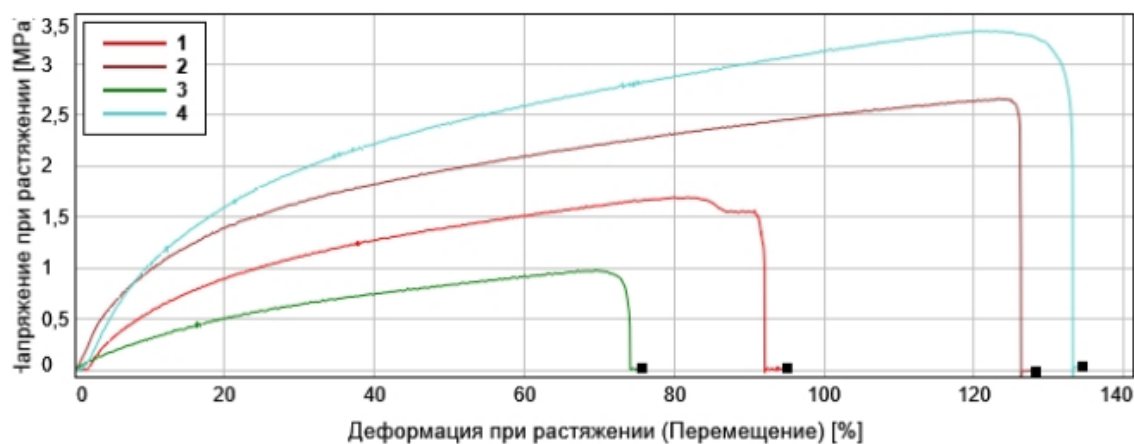


Рис. 3. Деформация в момент разрыва образцов биоразлагаемых пленок, %:
1 – образец 1; 2 – образец 2; 3 – образец 3; 4 – образец 4

Максимальный предел прочности выявлен у образца 3 (КК:Х в соотношении 2,0:0,5). Наибольшая деформация в момент разрыва материала наблюдается у образца 2 (КК:Х в соотношении 1,0:1,0). Показатель «предел прочности» сопоставим с показателем «деформация на разрыв». При увеличении концентрации хитозана в матрице на основе пластифицированного крахмала картофельного повышается показатель «предел прочности» и «деформация». При увеличении концентрации крахмала снижается показатель «предел прочности» и «деформация в момент разрыва». Данные изменения могли быть вызваны структурой материала, толщиной, кристалличностью, конфигурацией и химическим строением звена биополимера [8, 10].

Водопоглощение – это параметр, который позволяет определить степень гидрофобности материала. Диффузия влаги в материал сопровождается уменьшением в нем межмолекулярного взаимодействия. Влага, воздействуя на материал, может повлиять на размеры изделия, снизить механическую прочность, вызвать дефекты поверхности материала. Таким образом, необходимо оценивать возможность влияния внешней жидкой среды на материалы. Как правило, чем выше водопоглощение, тем хуже эксплуатационные свойства материала. С помощью данного показателя возможно объяснить процессы, проходящие при компостировании и окислении биоразлагаемых материалов. Полимеры из нефтепродуктов практически не впитывают влагу. Од-

нако материалы, биоразлагаемые на основе растительного сырья, способны к впитыванию значительного количества влаги, утрачивая при этом свои эксплуатационные свойства. Результаты исследования водопоглощение образцов пленок представлены в табл. 1.

Самое высокое водопоглощение наблюдается у образца 3, данный процесс может быть связан с поглощением гидрофильного наполнителя, в то время как самое низкое водопоглощение наблюдается у образца 2. При увеличении содержания крахмала в пленке увеличивается диффузия влаги в материал. При снижении концентрации хитозана снижается водопоглощение. При выдерживании материала при температуре от 90–95 °С наблюдается разрушение, а далее постепенное восстановление материала.

На заключительном этапе исследования у образцов биоразлагаемых пленок оценивалась миграция компонентов в симуляторы пищевых систем в течение 7 дней при температуре 20 °С. Результаты исследования миграции компонентов из исследуемых образцов биоразлагаемых пленок в симуляторы пищевых систем представлены в табл. 2.

Высокие показатели миграции компонен-

тов из образцов биоразлагаемых пленок в пищевые симуляторы наблюдались при погружении в гидрофильные имитаторы (этанол 10 % и уксусная кислота 3 %). Низкие показатели миграции компонентов из образцов биоразлагаемых пленок были обнаружены при инкубации в изооктане. Изооктан имитирует липофильные продукты со свободными жирами на поверхности. Высокая миграция компонентов в пищевые симуляторы наблюдается у образца 2 (картофельный крахмал 1,0 %/ хитозан 1,0 %) и у образца 3 (картофельный крахмал 2,0 %/ хитозан 0,5 %). Более низкая миграция компонентов в пищевые симуляторы выявлена у образца 1 (картофельный крахмал 1,0 %/ хитозан 0,5 %). Изучение процессов миграции составных компонентов из биоразлагаемой упаковки позволит контролировать сохранность продукта и оценивать эксплуатационные и технологические свойства материала [6, 7].

Выводы по результатам работы

Таким образом, результаты исследования показали, что при изменении вариации ингредиентов (крахмала картофельного и хитозана) в суспензии можно регулировать свойства будущей биоразлагаемой пленки, влияя на

Таблица 1
Результаты определения водопоглощение исследуемых образцов биоразлагаемых пленок

№ образца	Водопоглощение Δ , г / %		
	через 24 ч	через 48 ч к	через 96 ч
	к контролю	предыдущему значению	предыдущему значению
Образец 1	-11,44	8,01	3,45
Образец 2	2,97	1,02	-3,17
Образец 3	9,12	2,46	-11,56
Образец 4	-5,15	12,43	-6,84

Таблица 2
Миграция компонентов из исследуемых образцов биоразлагаемых пленок в имитаторы пищевых систем

№ образца	Миграция в пищевые симуляторы, мг/ дм^2		
	этанол	уксусная кислота	изооктан
Образец 1	0,1496	0,2699	0,0446
Образец 2	0,3893	растворился	0,0398
Образец 3	0,2085	0,2760	0,0889
Образец 4	0,2053	0,2971	0,1045

физико-механические характеристики, водопоглощение и миграцию веществ в упаковку и из нее. Наилучшие оптимальные показатели по прочности и водопоглощению наблюдаются у образца 2 (картофельный крахмал 1,0 %/ хитозан 1,5 %). Наилучшие результаты по исследованию миграции компонентов в пищевые

симуляторы были выявлены у образца 1 (картофельный крахмал 1,0 %/ хитозан 0,5 %). Полученные биоразлагаемые пленки могут быть использованы для создания упаковочных материалов, пленок и изделий кратковременного назначения для решения экологических проблем [9].

Список литературы

1. Гальбрайх Л.С. Хитин и хитозан: строение, свойства, применение // Соросовский образовательный журнал. 2001. Т. 7, № 1. С. 51–56.
2. Гулюк Н.Г. Крахмал и крахмалопродукты. М.: Агропромиздат, 1985. 240 с.
3. Крутько Э.Т., Прокопчук Н.Р., Глоба А.И. Технология биоразлагаемых полимерных материалов. Минск: Изд-во БГТУ, 2014. 105 с.
4. Лонг Ю. Биоразлагаемые полимерные смеси и композиты из возобновляемых источников. СПб.: Научные основы и технологии, 2013. 464 с.
5. Потороко И.Ю. Биоразлагаемые композитные материалы на основе картофельного крахмала и поливинилового спирта / И.Ю. Потороко, А.В. Малинин, А.В. Цатуров, А.В. Игнатова // Индустрия питания / Food Industry. 2022. Т. 7, № 4. С. 95–102. DOI: 10.29141/2500-1922-2022-7-4-11
6. Daniel Domene-López, Juan Carlos García-Quesada, Ignacio Martín-Gullón and Mercedes G. Montalbán. Influence of Starch Composition and Molecular Weight on Physicochemical Properties of Biodegradable Films // Polymers 11 (7), 2019, 17 p. DOI: 10.3390/polym11071084
7. Dutta P.K.; Tripathi S.; Mehrotra G. K.; Dutta J. Perspectives for chitosan based antimicrobial films in food applications // Food Chem. 2009, 114, p. 1173–1182. DOI: 10.1016/j.foodchem.2008.11.047
8. Javiera F. Reviler, Rui M.S. Cruz, Hélder D. Silva, António A. Vicente, Igor Khmelinskii, Margarida C. Vieira. Physico-mechanical properties of chitosan films with carvacrol and grape seed extract // Journal of Food Engineering. V. 115, 2013, p. 466–474. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2012.07.009
9. Cano A.; Fortunati E.; Cháfer M.; Kenny J.M.; Chiralt A.; González-Martínez C. Properties and ageing behaviour of pea starch films as affected by blend with poly(vinyl alcohol) // Food Hydrocoll. 2015, 48, p. 84–93. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2015.01.008
10. Luchese C.L.; Benelli P.; Spada J.C.; Tessaro I.C. Impact of the starch source on the physicochemical properties and biodegradability of different starch-based films // J. Appl. Polym. Sci. 2018, 11 p. DOI: 10.1002/app.46564
11. Kumar M.N.V. R. A review of chitin and chitosan applications // Reactive and Functional Polymers. 2000, 46, p. 1–27. DOI: 10.1016/s1381-5148(00)00038-9

References

1. Gal'braykh L.S. Chitin and chitosan: structure, properties, application. *Sorosovskiy obrazovatel'nyy zhurnal* [Soros Educational Journal], 2001, vol. 7, no. 1, pp. 51–56. (In Russ.)
2. Gulyuk N.G. *Krakhmal i krakhmaloprodukty* [Starch and starch products]. Moscow, 1985. 240 p.
3. Krut'ko E.T., Prokopchuk N.R., Globa A.I. *Tekhnologiya biorazlagaemykh polimernykh materialov* [Technology of biodegradable polymer materials]. Minsk, 2014. 105 p.
4. Long Yu. *Biorazlagaemye polimernye smesi i kompozity iz vozobnovlyaemykh istochnikov* [Biodegradable polymer mixtures and composites from renewable sources]. t. Petersburg, 2013. 464 p.
5. Potoroko I.Yu., Malinin A.V., Tsaturov A.V., Ignatova A.V. Biodegradable composite materials based on potato starch and polyvinyl alcohol. *Food Industry*, 2022, vol. 7, no. 4, pp. 95–102. (In Russ.) DOI: 10.29141/2500-1922-2022-7-4-11

6. Daniel Domene-López, Juan Carlos García-Quesada, Ignacio Martín-Gullón and Mercedes G. Montalbán. Influence of Starch Composition and Molecular Weight on Physicochemical Properties of Biodegradable Films. *Polymers*, 11 (7), 2019, 17 p. DOI: 10.3390/polym11071084
7. Dutta P.K.; Tripathi S.; Mehrotra G. K.; Dutta J. Perspectives for chitosan based antimicrobial films in food applications. *Food Chem.*, 2009, 114, p. 1173–1182. DOI: 10.1016/j.foodchem.2008.11.047
8. Javiera F. Reviler, Rui M.S. Cruz, Hélder D. Silva, António A. Vicente, Igor Khmelinskii, Margarida C. Vieira. Physico-mechanical properties of chitosan films with carvacrol and grape seed extract. *Journal of Food Engineering*, 2013, vol. 115, pp. 466–474. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2012.07.009
9. Cano A.; Fortunati E.; Cháfer M.; Kenny J.M.; Chiralt A.; González-Martínez C. Properties and ageing behaviour of pea starch films as affected by blend with poly(vinyl alcohol). *Food Hydrocoll*, 2015, 48, pp. 84–93. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2015.01.008
10. Luchese C.L.; Benelli P.; Spada J.C.; Tessaro I.C. Impact of the starch source on the physico-chemical properties and biodegradability of different starch-based films. *J. Appl. Polym. Sci.*, 2018, 11 p. DOI: 10.1002/app.46564
11. Kumar M.N.V. R. A review of chitin and chitosan applications. *Reactive and Functional Polymers*, 2000, 46, pp. 1–27. DOI: 10.1016/s1381-5148(00)00038-9

Информация об авторах

Малинин Артем Владимирович, аспирант кафедры «Пищевые и биотехнологии», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия, artemmalinin3@gmail.com

Цатуров Арам Валерикович, аспирант кафедры «Пищевые и биотехнологии», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия, aram-chel@mail.ru

Игнатова Анастасия Валерьевна, к.т.н., младший научный сотрудник кафедры «Техническая механика», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия, ignatovaav@susu.ru

Сонавайн Шириш, доктор философских наук, профессор Департамента химической инженерии, Национальный технологический институт, Варангал, шт. Телангана, Индия, shirish@nitw.ac.in

Information about the authors

Artem V. Malinin, Post-graduate student at the Department of Food and Biotechnologies, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia, artemmalinin3@gmail.com

Aram V. Tsaturov, Post-graduate student at the Department of Food and Biotechnologies, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia, aram-chel@mail.ru

Anastasia V. Ignatova, Candidate of Technical Sciences, Junior Researcher of the Department of Technical Mechanics, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia, ignatovaav@susu.ru

Shirish Sonawane, Doctor of Sciences (Philosophy), Professor of the Department of Chemical Engineering, National Institute of Technology, Telangana State, India, shirish@nitw.ac.in

Статья поступила в редакцию 12.02.2023

The article was submitted 12.02.2023