

Плёночные материалы на основе желатина, содержащие растительные экстракты

© 2023. Е. С. Широкова, к. х. н., доцент,
Е. В. Товстик, к. б. н., доцент, с. н. с., А. И. Фокина, к. б. н., доцент,
Вятский государственный университет,
610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,
e-mail: usr06779@vyatsu.ru

Разработка экологичных и безопасных плёночных материалов на биооснове является перспективным направлением в области производства упаковки, в медицине и сельском хозяйстве. Среди биоразлагаемых полимеров на биооснове наибольший интерес вызывают композиции на основе желатина. В данном исследовании представлены результаты исследования плёнок на основе желатина с включением водных экстрактов из листьев облепихи, подорожника большого, хвои сосны. Плёнки получали методом полива из раствора, приготовленного на растительных экстрактах и дистиллированной воды в качестве контроля. Водные экстракты из растительного сырья получали в режиме отвара. С помощью физико-химических методов анализа определён качественный и количественный состав полифенольных соединений (сумма полифенолов, флавоноиды и дубильные вещества), входящих в состав экстрактов. Установлена антиоксидантная активность растительных экстрактов. Наибольшее количество антиоксидантов (64 мг/100 см³) выявлено в экстрактах из листьев облепихи. Введение в состав желатиновых плёнок растительных экстрактов не вызывало существенных изменений в их термической стабильности, что подтверждено данными термогравиметрического анализа. Существенные изменения свойств по сравнению с контролем отмечены для образцов, содержащих экстракт листьев облепихи. Так, значение напряжения при разрыве составило 11,6 МПа, а удлинение при разрыве – 100% (11,4 МПа и 65% для контроля соответственно). Для всех исследованных образцов отмечено меньшее водопоглощение (200–223% по истечении 60 мин) по сравнению с контролем (254% по истечении 60 мин) и значения паропроницаемости, сопоставимые с контролем. Такое сочетание свойств плёнок совместно с высоким содержанием антиоксидантов в составе растительных экстрактов позволяет рассматривать данные материалы как перспективные для создания биоразлагаемой упаковочной плёнки, в том числе обладающей антибактериальной активностью.

Ключевые слова: подорожник большой, облепиха крушиновидная, сосна обыкновенная, полифенолы, биоразлагаемые полимеры.

Gelatin films containing plant extracts

© 2023. E. S. Shirokova ORCID: 0000-0001-5735-3489[?]
E. V. Tovstik ORCID: 0000-0003-1861-6076[?]
A. I. Fokina ORCID: 0000-0001-8265-8882[?]
Vyatka State University,
36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,
e-mail: usr06779@vyatsu.ru

Polymer films based on traditional synthetic polymers are widely used throughout the world. However, the impossibility of biodegradation of synthetic polymers in the environment and, as a result, the accumulation of polymeric waste stimulates using biodegradable bio-based polymers instead of traditional ones. One of them is gelatin. Gelatin is biodegradable, it has good mechanical and barrier properties, high film forming ability and widely distributed.

Presented research includes results of an investigation of gelatin films based on aqueous extracts from the leaves of sea buckthorn leaves, plantain leaves, pine needles (film based on distilled water used as a control). The qualitative and quantitative composition of polyphenolic compounds (the sum of polyphenols, flavonoids and tannins) that make up the extracts was determined using physico-chemical methods of analysis. The antioxidant activity of plant extracts has been established. The highest amount of antioxidants (64 mg/100 cm³) was found in extracts from sea buckthorn leaves. Using plant extracts in the composition of gelatin films did not cause significant changes in their thermal stability; it was confirmed by thermogravimetric analysis. Significant changes in properties compared to the control were noted for samples containing sea buckthorn leaf extract. Thus, the value of the stress at break was 11.6 MPa, and the elongation at break was 100% (11.4 MPa and 65% for control, respectively). For all the studied samples,

there was a lower water absorption (200–223% after 60 minutes) compared to the control (254% after 60 minutes) and vapor permeability values comparable to the control. Such combination of film properties, with a high content of antioxidants in plant extracts, allows us to consider these materials as promising for the creation of biodegradable packaging films with antibacterial activity.

Keywords: *Plantago major* L., *Hippophae rhamnoides* L., *Pinus sylvestris* L., polyphenols, biodegradable polymers.

Полимерные плёночные материалы широко применяются во всём мире для упаковки пищевых и непищевых продуктов, в строительстве, сельском хозяйстве и медицине. В настоящее время большая их часть производится из полимерных материалов, получаемых из ископаемого сырья. Однако невозможность биодegradации (разложения) большинства синтетических полимеров в окружающей среде и, как следствие, накопление полимерных отходов, а также ограниченность запасов ископаемого сырья, стимулируют интерес к использованию биоразлагаемых полимеров на биооснове взамен традиционных.

В качестве полимеров на биооснове выделяют белки, полисахариды и липиды. Среди белков перспективным материалом является желатин [1], представляющий собой продукт денатурации коллагена, получаемого в основном от крупного рогатого скота, свиней и рыб. Желатин обладает хорошей плёнкообразующей способностью, биосовместимостью; он нетоксичен, имеет повсеместное распространение, прозрачен, а также может использоваться в качестве носителя различных соединений и добавок [2].

Модификация желатина путём включения в его состав различных соединений позволяет получать материалы с подходящими механическими, барьерными, антиоксидантными и противомикробными свойствами, которые могут быть использованы в производстве упаковок [3], в медицине [4], в производстве плёнки для мульчирования и для производства продуктов питания [5].

К наиболее экологичным и безопасным добавкам, позволяющим модифицировать биоразлагаемые полимеры, относят полифенольные вещества [6]. Их потенциальным источником выступают растительные экстракты.

Облепиха крушиновидная является широко распространённым растением, известна как ценное лекарственное и пищевое сырьё. В промышленных масштабах в большей степени используются ягоды облепихи. При этом листья облепихи, по сравнению с плодами, содержат больше полифенольных веществ. В настоящее время предлагается использовать экстракты из листьев облепихи в качестве

нетоксичных агентов для сшивания биополимеров [7]. Наряду с облепихой, в качестве источников ценных БАВ (антиоксиданты, флавоноиды и т. д.) давно зарекомендовали себя такие распространённые растения, как подорожник большой и сосна обыкновенная [8, 9].

Целью данной работы являлась оценка применимости экстрактов из облепихи крушиновидной, листьев подорожника большого и хвои сосны обыкновенной для модификации плёночных материалов на основе желатина.

Объекты и методы исследования

Объектами исследования служили неочищенные водные экстракты из листьев облепихи крушиновидной (*Hippophae rhamnoides* L.), подорожника большого (*Plantago major* L.), хвои сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), а также желатиновые плёнки на их основе.

Приготовление и анализ растительных экстрактов. Растительное сырьё измельчали в лабораторной мельнице, пропускали через сито с диаметром отверстий 1 мм. Водные экстракты получали в режиме отвара: 30 мин на кипящей водяной бане, 15 мин при комнатной температуре. Соотношение сырьё : дистиллированная вода составляло 1 : 20. Водный экстракт фильтровали через бумажный фильтр «синяя лента».

Определение концентрации полифенольных соединений проводили спектрофотометрическим методом с реактивом Фолина-Чокальтеу по методике, изложенной в ГОСТ Р 55488-2013. В качестве внутреннего стандарта использовали галловую кислоту [10]. Профиль полифенольных соединений исследовали с помощью общепринятых качественных реакций [11].

Для количественного определения флавоноидов использовали методику по ГОСТ 13399-89, основанную на способности их окрашенных комплексов с хлоридом алюминия поглощать монохроматический свет при длине волны 410 нм. В качестве внутреннего стандарта использовали рутин. Определение антиоксидантной активности и содержания дубильных веществ по ОФС.1.5.3.0008.18 проводили методом титриметрии [12]. Стан-

дартизацию раствора перманганата калия проводили по кверцетину.

Содержание экстрактивных веществ определяли гравиметрическим методом. Для сухих экстрактов снимали ИК-спектры на ИК-Фурье-спектрометре «Инфралюм ФТ-801» (ООО НПФ «СИМЕКС», Россия).

Приготовление плёнкообразующих растворов и плёнкообразование. Приготовление плёнкообразующих растворов осуществляли по технологии [13]. Желатин марки П-11 в количестве 10 масс. % растворяли в дистиллированной воде (контроль) или заранее приготовленном растительном экстракте. Смесь нагревали на водяной бане при температуре 45 °С до полного растворения в течение 30 мин. В приготовленную смесь добавляли глицерин (в качестве пластификатора) в количестве 5 масс.%, смесь перемешивали. Для удаления пузырьков воздуха раствор отстаивали в течение 30 мин в термостате при температуре 37 °С. Полученные растворы отливали в формы размером 20,0 × 2,5 см по 10 см³. Полученные плёнки сушили при комнатной температуре (20±2 °С) и относительной влажности воздуха 40±5%. Высушенные плёнки перед испытанием кондиционировали в эксикаторе над силикагелем в течение 72 ч.

Характеристика плёнок. Регистрацию спектров поглощения исследуемых плёнок в ближней и средней ИК области проводили с помощью ИК-Фурье-спектрометра «Инфралюм ФТ-801» (ООО НПФ «СИМЕКС», Россия) с последующей идентификацией функциональных групп. Измерения проводили при комнатной температуре.

Толщину полученных плёнок определяли толщиномером индикаторным ТН 10-60 с точностью до 0,01 мм не менее чем в пяти точках с последующим расчётом среднего значения.

Температурные характеристики полученных плёнок оценивали с помощью термического анализатора (ТГ/ДТА) DTG-60 («Shimadzu», Япония). Измерения проводили в атмосфере воздуха (150 см³/мин) в платиновых тиглях. Масса образцов для испытания составляла 2,35±0,35 мг; оксид алюминия использовали в качестве эталона. Температурная программа: нагрев со скоростью 10 °С/мин от комнатной температуры до 550 °С.

Исследование эксплуатационных свойств плёнок. Прочность при растяжении и удлинение при разрыве каждой плёнки оценивали на разрывной машине AG-X5 («Shimadzu», Япония) при температуре (23±2) °С и скорости движения активного захвата 100 мм/мин.

Для исследования готовили образцы плёнок размером 1 × 5 см; образцы растягивали в вертикальном направлении; в ходе испытания фиксировали напряжение и удлинение при разрыве. Испытания проводили на 5 образцах и рассчитывали средние значения.

Водопоглощение плёнок изучали по характеру их набухания в воде гравиметрическим методом. Плёнку размером 1,0 × 1,0 см помещали на капроновую сетку и, предварительно определив их исходную массу на аналитических весах, опускали в ёмкость, наполненную дистиллированной водой. Повторное взвешивание сетки с плёнкой проводили через 15, 30, 45, 60 мин после начала опыта. Параллельно определяли массу пустой сетки (контроль) до и после её пребывания в воде в течение того же промежутка времени, что и в опыте с плёнкой. Измерения проводили в четырёхкратной повторности [14].

Паропроницаемость плёнок определяли гравиметрическим методом. Образцы плёнок с целостной структурой закрепляли с помощью парафильма на горлышке стеклянных пробирок с 2 см³ дистиллированной воды. Систему взвешивали, помещали в эксикатор над силикагелем. Повторное взвешивание проводили через 24, 48 и 72 ч после начала опыта. Измерения проводили в трёхкратной повторности [14].

Статистическую обработку результатов всех измерений проводили согласно ГОСТ Р 8.736-2011. Статистическую значимость различий между средними значениями устанавливали при $p < 0,05$. Данные выражали как среднее значение ± стандартное отклонение. Взаимосвязь исследуемых показателей оценивали с помощью ранговых коэффициентов корреляции Спирмена (r). Расчёты выполняли в программе Microsoft Excel.

Результаты и обсуждение

Характеристика растительных экстрактов. Исследование содержания и спектра полифенольных веществ в составе растительных экстрактов представляло интерес с точки зрения их антиоксидантных свойств, а также потенциала включения в состав плёнок в качестве биоконсервантов и антибактериальных агентов [15].

В ходе сравнительной оценки было выявлено, что экстракты из листьев облепихи содержат в 2,8 и 3,3 раза больше полифенолов, чем из хвои сосны и листьев подорожника (табл. 1).

В результате качественного анализа состава фенольных соединений в исследуемых экстрактах были выявлены флавонолы, флавононы, флавоноиды и кумарины в зависимости от вида растительного сырья (табл. 2).

Экстракты из листьев облепихи отличались наличием антоцианов, а хвои – халконов и ауранов.

Наибольшее содержание флавоноидов обнаружено в экстрактах из листьев облепихи (18,29 мкг/см³). Различия с листьями подорожника и хвоей сосны составило в 2,3 и 7,6 раза соответственно (табл. 1).

Наряду с флавоноидами, во всех исследованных экстрактах были идентифицированы дубильные вещества. Наибольшее их содержание (3,33 мг/см³) отмечено для листьев облепихи. В экстрактах из листьев подорожника и хвои сосны их содержание было ниже, чем в листьях облепихи, в 5,0 и 2,6 раза соответственно. Поскольку одним из наиболее известных свойств полифенолов является их антиоксидантная активность, особый интерес представляла оценка значения данного показателя в исследуемых раститель-

ных экстрактах. Так, в случае экстрактов из листьев облепихи регистрируемые значения антиоксидантной активности были в 2,3 и 2,1 раза выше, чем из листьев подорожника и хвои соответственно.

В целом по сумме экстрактивных веществ, содержащихся в экстрактах, исследуемое растительное сырьё можно расположить в следующий ряд: листья подорожника < листья облепихи < хвоя сосны.

Наличие в составе исследуемых экстрактов веществ фенольной природы подтверждалось результатами ИК-Фурье-спектроскопии. На ИК-спектрах (рис. 1) порошков изучаемых экстрактов выделялись широкие полосы поглощения [16] в интервале 3800–3000 см⁻¹ (3750–3700 см⁻¹ – полосы поглощения, обусловленные валентными колебаниями свободных гидроксильных групп; 3400–3200 см⁻¹ – полосы поглощения, обусловленные внутри- и межмолекулярными водородными связями; 3385–2850 см⁻¹ – полосы поглощения, характерные для ароматической части флавоноидов; 3300–2500 см⁻¹ – полосы поглощения, обусловленные связанными гидроксогруппами);

Таблица 1 / Table 1

Состав и характеристика растительных экстрактов
Composition and characteristics of plant extract

Показатель Index	Растительное сырьё / Plant materials		
	листья облепихи sea buckthorn leaves	листья подорожника большого plantain leaves	хвоя сосны pine needles
Полифенольные соединения, мг/см ³ Polyphenolic compounds, mg/cm ³	3,35±0,30	1,02±0,10	1,18±0,18
Флавоноиды, мкг/см ³ Flavonoids, µg/cm ³	18,29±0,11	7,91±0,03	2,42±0,12
Дубильные вещества, мг/см ³ Tanins, mg/cm ³	3,33±0,30	0,665±0,010	1,30±0,13
Антиоксиданты, мг/100 см ³ Antioxidants, mg/100 cm ³	64±6	28,1±2,8	30,0±3,0
Экстрактивные вещества, мг/см ³ Extractives, mg/cm ³	10,9±0,11	12,1±1,2	6,2±0,6

Таблица 2 / Table 2

Качественный состав фенольных соединений водных экстрактов
Qualitative composition of phenolic compounds in aqueous extracts

Растительное сырьё Plant materials	Группа полифенольных соединений* Group of polyphenolic compounds*						
	1	2	3	4	5	6	7
Листья облепихи / Sea buckthorn leaves	+	+	+	+	–	–	–
Листья подорожника большого / Plantain leaves	+	+	+	–	–	–	+
Хвоя сосны / Pine needles	+	+	+	–	+	+	+

Примечание: 1 – флавонолы, 2 – флавононы, 3 – флавоноиды, 4 – антоцианы, 5 – халконы, 6 – аураны, 7 – кумарины.

Note: * 1 – flavonols, 2 – flavonones, 3 – flavonoids, 4 – anthocyanins, 5 – chalcones, 6 – aurons, 7 – coumarins.

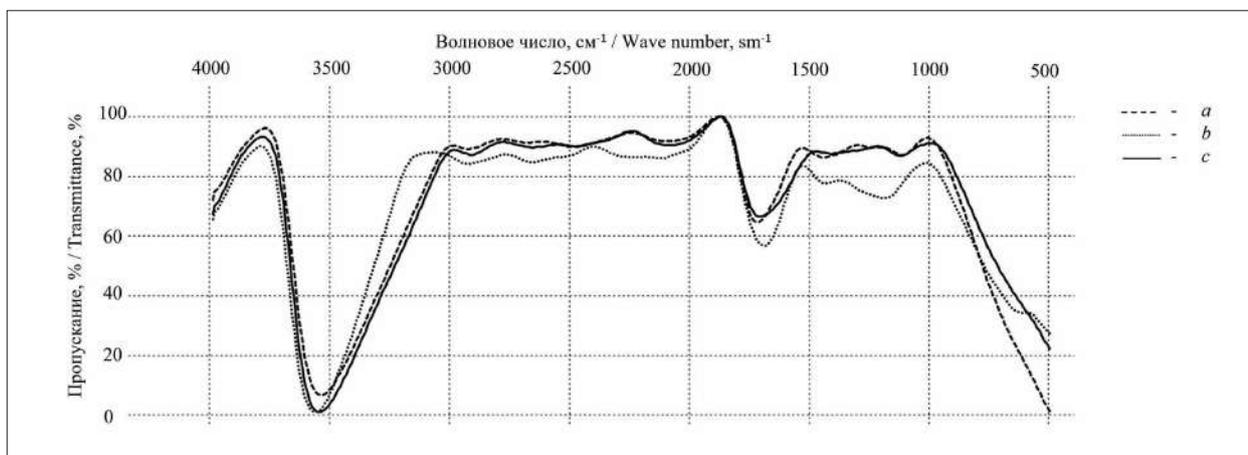


Рис. 1. ИК-спектры экстрактов листьев облепихи (а), листьев подорожника большого (b) и хвои сосны (с)

Fig. 1. IR-spectrum of sea buckthorn leaves (a), plantain leaves (b) and pine needles (c)

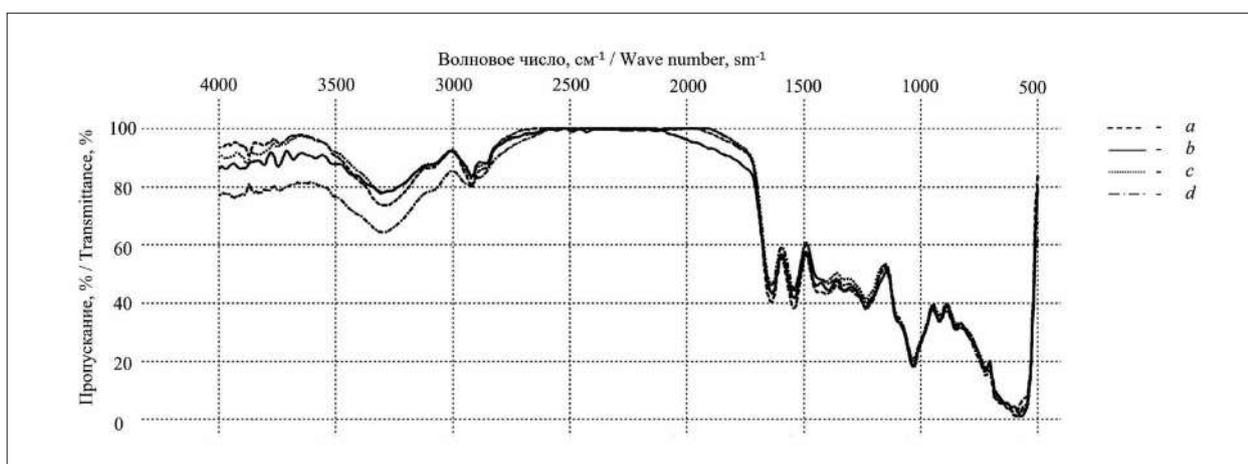


Рис. 2. ИК-спектры контроля (а) и плёнок, содержащих экстракт листьев облепихи (b), листьев подорожника большого (с) и хвои сосны (d)

Fig. 2. IR-spectra of control (a) and films containing extract of sea buckthorn leaves (b), plantain leaves (c) and pine needles (d)

1860–1500 cm^{-1} связаны с наличием колебания $\text{C}=\text{O}$ -групп.

Однако следует отметить, что использование ИК-Фурье-спектроскопии в анализе экстрактов ограничено в связи с их многокомпонентностью.

Характеристика плёнок на основе желатина с включением растительных экстрактов. ИК-спектры плёнок, приготовленных на основе желатина с включением экстрактов из растительного сырья, в большей степени были идентичны спектрам контроля. Изменения в спектрах опытных вариантов были незначительны по сравнению с контролем (рис. 2).

Основными полосами поглощения для контроля (плёнка на основе желатина, без включения растительного экстракта) являются следующие [17]: широкая полоса

в интервале частот 3300–3500 cm^{-1} (соответствует валентным колебаниям $\text{N}-\text{H}$ -группы), характерные пики поглощения при частотах 1654 cm^{-1} (амид I, соответствует валентным колебаниям групп CO , CN), 1542 cm^{-1} (амид II, соответствует валентным колебаниям $\text{N}-\text{H}$, CN) и 1234 cm^{-1} (амид III, соответствует валентным колебаниям $\text{C}-\text{N}$ и $-\text{NH}$).

Пик, наблюдаемый при 1031 cm^{-1} , связан с образованием водородных связей, возникающими между пластификатором (OH -группа глицерина) и структурой полимера [18, 19].

Термическая стабильность является одной из значимых характеристик плёночных материалов. В данной работе термические свойства плёнок были проанализированы с помощью кри-вых термогравиметрического анализа (рис. 3).

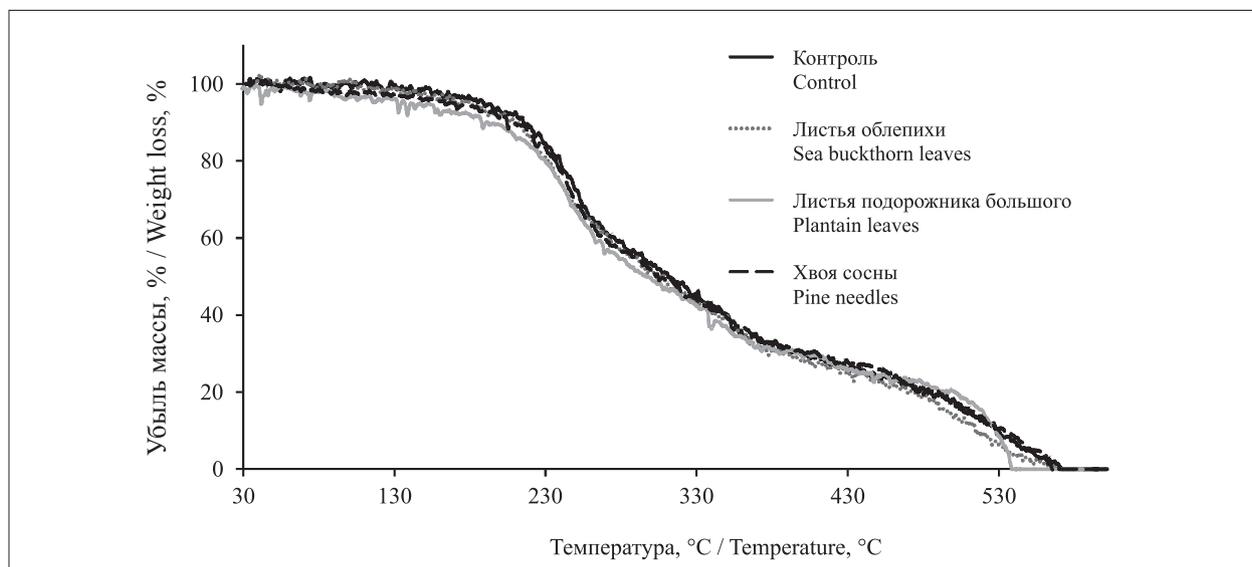


Рис. 3. Термограммы исследуемых плёнок
Fig. 3. Thermograms of investigated films

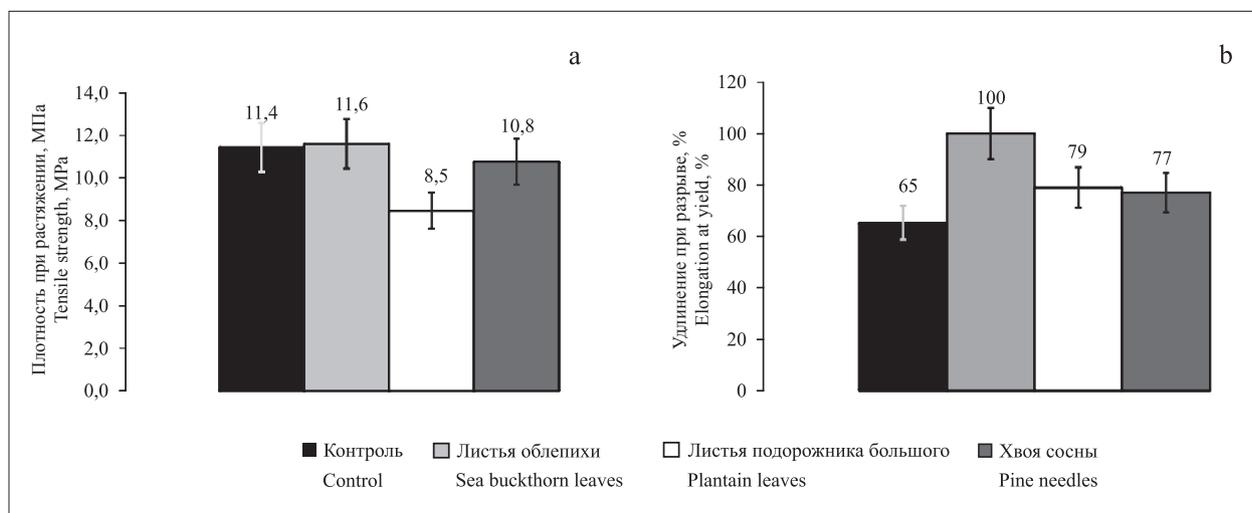


Рис. 4. Физико-механические показатели плёнок: прочность при растяжении (a) и удлинение при разрыве (b)
Fig. 4. Physical and mechanical parameters: tensile strength (a) and elongation at break (b) for the studied films

Для всех исследованных образцов, в том числе контроля, наблюдали три основные стадии потери массы: первая стадия (до 140 °C) связана с испарением влаги из плёнок [20]; вторая стадия (от 140 °C до 270 °C) вызвана потерей глицерина [21]; третья стадия (от 270 °C) обусловлена разложением основного пептида желатиновой матрицы [3].

Эксплуатационные свойства плёнок. Полученные значения физико-механических показателей (прочность при растяжении и удлинение при разрыве) для плёнок представлены на рисунке 4.

Прочностные показатели для контрольной плёнки и плёнок, содержащих растительные

экстракты, сходны с представленными в литературе [21, 22].

Для всех исследованных образцов удлинение при разрыве было больше, чем в контроле. Так, для плёнок, содержащих экстракт листьев облепихи, удлинение при разрыве увеличилось до 100% по сравнению с 65%, отмеченными для контрольного образца. Данный факт может быть связан с наличием флавоноидов, которые играют роль пластификатора: для образцов, приготовленных на основе экстрактов, содержащих большее количество флавоноидов, отмечается большее удлинение при разрыве.

Присутствие пластификаторов одновременно с увеличением эластичности обычно

вызывает снижение прочности, что и наблюдали для образцов плёнок, содержащих экстракт из листьев подорожника и хвои сосны. Для образцов, содержащих экстракт из листьев облепихи, прочность сохранялась на уровне контрольного образца, что возможно связано с более высоким содержанием дубильных веществ, которые могут участвовать в образовании дополнительных связей между макромолекулами желатина, способствуя повышению прочности плёнки.

Исследование способности плёнок к водопоглощению важно с точки зрения характеристики их стабильности. Данная характеристика определяется многими факторами. Один из них – продолжительность контакта плёнки с водой. В ходе исследования водопоглощения плёнок в течение 60 мин отмечали увеличение количества поглощённой воды (рис. 5).

Независимо от варианта опыта водопоглощение образцов достигало 200–250% от их первоначальной массы. Наибольшую степень водопоглощения отмечали в контрольном варианте, наименьшую – у плёнок с включением экстракта из листьев подорожника. В целом тенденция к снижению уровня водопоглощения плёнок, по сравнению контролем, была характерна для всех вариантов плёнок с включением растительных экстрактов. Аналогичный эффект снижения водопоглощения плёнок за счёт добавления растительных экстрактов описан в литературе [23, 24]. Такое явление может быть связано с изменением молекулярной упаковки желатина [25]

и средства к молекулам растворителя за счёт появления веществ, содержащихся в растительных экстрактах, например, гидрофобной природы (витамины, масла и т. п.) [26].

Использование растительных экстрактов в меньшей степени влияло на абсорбционные свойства плёнок (рис. 6).

Использование экстракта из листьев облепихи обеспечивало плёнкам большую паропроницаемость по сравнению с контролем. Так, на протяжении всего периода наблюдений (24–72 ч) паропроницаемость плёнок на основе экстракта из листьев облепихи была выше, чем с экстрактами из листьев подорожника и хвои.

Между величиной паропроницаемости и водопоглощения прослеживали взаимосвязь среднего уровня ($r = 0,63$), если в расчётах учитывать все варианты эксперимента (без учёта контроля), то $r = 0,97$.

Логично предположить, что изменение эксплуатационных свойств плёнок связано с химическим составом используемых растительных экстрактов. Несмотря на многочисленные данные о возможности снижения водопоглощения и паропроницаемости плёнок за счёт добавления танина (дубильные вещества) в их состав, для исследуемых плёнок, напротив, отмечали усиление данных свойств [27]. Отмечали также следующую зависимость: чем больше полифенолов было в экстракте, тем выше показатели паропроницаемости и водопоглощения регистрировали у плёнок на их основе. Между величинами

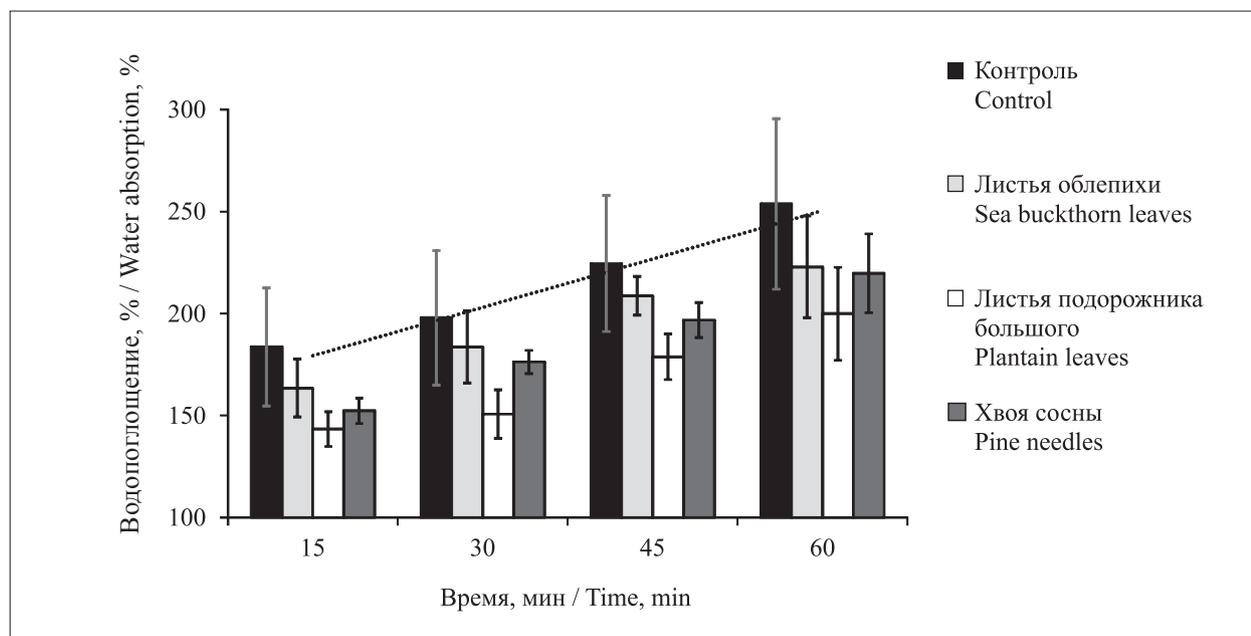


Рис. 5. Динамика водопоглотительной способности плёнок после принудительной сушки
 Fig. 5. Dynamics of water absorption capacity of films after forced drying

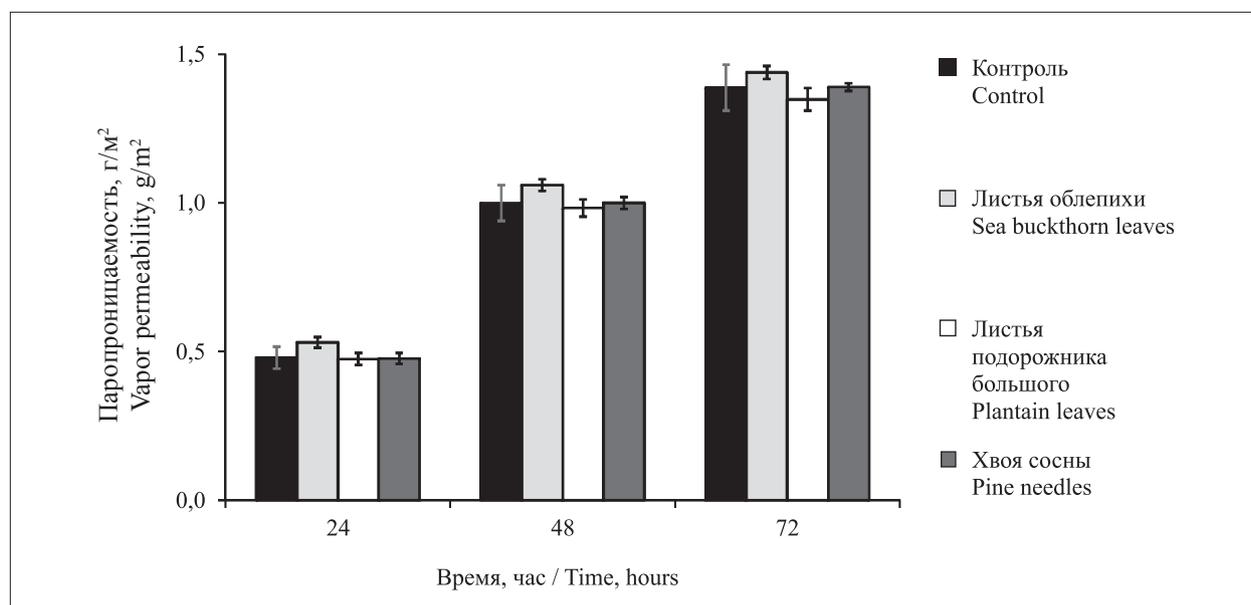


Рис. 6. Динамика паропрооницаемости плёнок различного состава
Fig. 6. Dynamics of vapor permeability of films of various compositions

водопоглощения и количествами полифенолов, дубильных веществ и антиоксидантов отмечали очень тесную положительную взаимосвязь ($r \geq 0,92$ без учёта контроля). Между величинами паропрооницаемости и количеством полифенолов, дубильных веществ и антиоксидантов в экстрактах также отмечена тесная корреляционная взаимосвязь ($r = 0,98-0,99$ без учёта контроля). Это может быть связано с тем, что танины, особенно конденсируемый танин, могут ковалентно сшиваться с белковыми молекулами с образованием белково-фенольных полимеров и, таким образом, улучшать некоторые физико-химические свойства плёночных материалов на основе желатина [28].

Заклучение

Проведённые исследования позволяют заключить, что введение в состав плёночных материалов на основе желатина растительных экстрактов, содержащих полифенольные вещества, позволяет регулировать физико-химические свойства получаемых плёнок. Существенные изменения, по сравнению с контролем, отмечены для образцов, содержащих экстракт листьев облепихи: большее удлинение при разрыве при сохранении напряжения при разрыве на уровне контроля, меньшее водопоглощение и большая паропрооницаемость в сравнении с контролем. Такое изменение эксплуатационных свойств обусловлено существенно большим

содержанием веществ полифенольной природы: флавоноидов и дубильных веществ, которые выполняют роль пластификаторов и сшивающих агентов. Такое сочетание свойств совместно с высоким содержанием антиоксидантов в составе экстракта из листьев облепихи позволяет определить направления использования рассматриваемых материалов, среди которых можно выделить создание упаковочной плёнки, в том числе обладающей антибактериальной активностью. Учитывая способность желатина к биодegradации [29], можно также ожидать, что получаемые плёнки будут биоразлагаемы.

Литература

1. Riguetto C.V.T., Rosseto M., Alessandretti I., de Oliveira R., Wohlmuth D.A.R., Menezes J.F., Loss R.A., Dettmer A., Pizzutti I.R. Gelatin films from wastes: A review of production, characterization, and application trends in food preservation and agriculture // Food Research International. 2022. V. 162. Part B. Article No. 112114.
2. Riguetto C.V.T., Nazari M.T., Massuda L.Á., Ostwald B.E.P., Piccin J.S., Dettmer A. Production and environmental applications of gelatin-based composite adsorbents for contaminants removal: a review // Environ. Chem. Lett. 2021. V. 19. P. 2465–2486.
3. Li K., Jin Sh., Chen H., Li J. Bioinspired interface engineering of gelatin/cellulose nanofibrils nanocomposites with high mechanical performance and antibacterial properties for active packaging // Composites Part B: Engineering. 2019. V. 171. P. 222–234.

4. Irfan N.I., Zubir A.Z.M., Suwandi A., Haris M.S., Jaswir I., Lestari W. Gelatin-based hemostatic agents for medical and dental application at a glance: A narrative literature review // *The Saudi Dental Journal*. 2022. V. 34. P. 699–707.
5. Rosseto M., Rigueto C.V.T., Krein D.D.C., Massuda L.A., Balb'e N.P., Colla L.M., Dettmer A. Combined effect of transglutaminase and phenolic extract of *Spirulina platensis* in films based on starch and gelatin recovered from chrome III tanned leather waste // *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*. 2021. V. 15. No. 5. P. 1406–1420.
6. Roy S., Ezati P., Rhim J.-Wh. Fabrication of antioxidant and antimicrobial pullulan/gelatin films integrated with grape seed extract and sulfur nanoparticles // *ACS Appl. Bio Mater*. 2022. V. 5. No. 5. P. 2316–2323.
7. Вэлинг А., де Конэн А.А.П. Способ сшивания биополимеров // Патент RU 2 732 928 С1. Заявка: 2019142085, 14.07.2017. Дата регистрации: 24.09.2020.
8. Немерешина О.Н., Гусев Н.Ф., Малкова Т.Л. Изучение биологически активных веществ и антимикробной активности листьев подорожника ланцетного *Plantago lanceolata* // *Башкирский химический журнал*. 2014. № 4. Т. 21. С. 133–142.
9. Лебедева Д.Д., Трусов Н.А., Соломонова Е.В., Ноздрин Т.Д., Меер Т.П. Перспективы использования хвойных растений Московского региона в качестве биобезопасного источника аскорбиновой кислоты // *Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии*. 2018. № 8. С. 31–35.
10. Фокина А.И., Скугорева С.Г., Трефилова Л.В., Даровских Л.В. Определение показателей окислительного стресса в мясе лекарственной при действии микромицета *Fusarium culmorum* и его антагонистов // *Теоретическая и прикладная экология*. 2022. № 2. С. 77–83.
11. Федосеева Л.М., Кутателадзе Г.Р. Изучение некоторых фенольных соединений надземной части щавеля кислого, развивающегося на территории Алтайского края // *Химия растительного сырья*. 2017. № 9. С. 91–96.
12. Максимова Т.В., Никулина И.Н., Пахомов В.П., Шкарина Е.И., Чумакова Э.В., Арзамасцев А.П. Способ определения антиокислительной активности // Патент RU 2170930 С1. Заявка: 2000111426/14, 2000.05.05. Дата публикации: 20.07.2001.
13. Шлейкин А.Г., Шаталов И.С., Шаталова А.С. Влияние трансглутаминазы на механические характеристики упаковочного материала на основе желатина // *Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств»*. 2014. № 2 [Электронный ресурс] <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-transglutaminazy-na-mehaniicheskie-harakteristiki-upakovochного-materiala-na-osnove-zhelatina> (Дата обращения: 26.06.2023).
14. Ковязина Н.А. Изучение физико-химических свойств плёнок лекарственных СЕКСТОФАГ // *Вестник ВГУ. Серия: Химия. Биология. Фармация*. 2022. № 1. С. 78–84.
15. Takó M., Kerekes E.B., Zambrano C., Kotogán A., Papp T., Krisch J., Vágvölgyi C. Plant phenolics and phenolic-enriched extracts as antimicrobial agents against food-contaminating microorganisms // *Antioxidants*. 2020. V. 9. No. 2. Article No. 165.
16. Тринева О.В., Рудая М.А., Гудкова А.А., Сливкин А.И. Применение ИК-спектроскопии в анализе лекарственного растительного сырья // *Вестник ВГУ. Серия: Химия. Биология. Фармация*. 2018. № 4. С. 187–194.
17. Ямпольская Г.П., Тарасевич Б.Н., Еленский А.А. Вторичная структура глобулярных белков в адсорбционных слоях на границе фаз раствор-воздух по данным ИК-спектроскопии с Фурье-преобразованием // *Коллоидный журнал*. 2005. Т. 67. № 3. С. 426–432.
18. Cerqueira M.A., Souza B.W., Teixeira J.A., Vicente A.A. Effect of glycerol and corn oil on physicochemical properties of polysaccharide films: a comparative study // *Food Hydrocolloids*. 2012. V. 27. No. 1. P. 175–184.
19. Shankar S., Teng X., Li G., Rhim J.W. Preparation, characterization, and antimicrobial activity of gelatin/ZnO nanocomposite films // *Food Hydrocolloids*. 2015. V. 45. P. 264–271.
20. Nilsuwan K., Benjakul S., Prodpran T. Properties and antioxidative activity of fish gelatin-based film incorporated with epigallocatechin gallate // *Food Hydrocolloids*. 2018. V. 80. P. 212–221.
21. Luo M., Cao Y., Wang W., Chen X., Cai J., Wang L., Xiao J. Sustained-release antimicrobial gelatin film: effect of chia mucilage on physicochemical and antimicrobial properties // *Food Hydrocolloids*. 2019. V. 87. P. 783–791.
22. Amjadi S., Emaminia S., Heyat Davudian Sh., Pourmohammad S., Hamishehkar H., Roufegarinejad L. Preparation and characterization of gelatin-based nanocomposite containing chitosan nanofiber and ZnO nanoparticles // *Carbohydrate Polymers*. 2019. V. 216. P. 376–384.
23. Xu M., Yu X., Chen X., Yuan G. Physico-chemical, biological properties of films based on chitosan/gelatin with finger bran extract // *Food Measure*. 2022. V. 16. P. 2939–2947.
24. Kavusi G., Dadfar S.M.M., Purfard A.M. Mechanical, physical, antioxidant and antimicrobial properties of thymol-containing gelatin films for potential use as nano-layering for wounds // *Journal of Food Science*. 2013. V. 78. No. 2. P. 244–250.
25. Иржак В.И., Королев Г.В., Соловьев М.Е. Межмолекулярное взаимодействие в полимерах и модель физической сетки // *Успехи химии*. 1997. Т. 66. № 2. С. 179–200.
26. Nastasi J.R., Kontogiorgos V., Daygon V.D., Fitzgerald M.A. Pectin-based films and coatings with plant extracts as natural preservatives: A systematic review // *Trends in Food Science & Technology*. 2022. V. 120. P. 193–211.
27. Wang H., Wang L. Developing a bio-based packaging film from soya by-products incorporated with valonea tannin // *Journal of Cleaner Production*. 2017. V. 143. P. 624–633.

28. Nie X., Zhao L., Wang N., Meng X. Phenolics-protein interaction involved in silver carp myofibrillar protein films with hydrolysable and condensed tannins // *LWT – Food Science and Technology*. 2017. V. 81. P. 258–264.

29. Rudnik E. *Compostable polymer materials*. Second Edition. Elsevier, 2019. 410 p.

References

1. Rigueto C.V.T., Rosseto M., Alessandretti I., de Oliveira R., Wohlmuth D.A.R., Menezes J.F., Loss R.A., Dettmer A., Pizzutti I.R. Gelatin films from wastes: A review of production, characterization, and application trends in food preservation and agriculture // *Food Research International*. 2022. V. 162. Part B. Article No. 112114. doi: 10.1016/j.foodres.2022.112114

2. Rigueto C.V.T., Nazari M.T., Massuda L.Á., Ostwald B.E.P., Piccin J.S., Dettmer A. Production and environmental applications of gelatin-based composite adsorbents for contaminants removal: a review // *Environ. Chem. Lett.* 2021. V. 19. P. 2465–2486. doi: 10.1007/s10311-021-01184-0

3. Li K., Jin Sh., Chen H., Li J. Bioinspired interface engineering of gelatin/cellulose nanofibrils nanocomposites with high mechanical performance and antibacterial properties for active packaging // *Composites Part B: Engineering*. 2019. V. 171. P. 222–234. doi: 10.1016/j.compositesb.2019.04.043

4. Irfan N.I., Zubir A.Z.M., Suwandi A., Haris M.S., Jaswir I., Lestari W. Gelatin-based hemostatic agents for medical and dental application at a glance: A narrative literature review // *The Saudi Dental Journal*. 2022. V. 34. P. 699–707. doi: 10.1016/j.sdentj.2022.11.007

5. Rosseto M., Rigueto C.V.T., Krein D.D.C., Massuda L.A., Balb'e N.P., Colla L.M., Dettmer A. Combined effect of transglutaminase and phenolic extract of *Spirulina platensis* in films based on starch and gelatin recovered from chrome III tanned leather waste // *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*. 2021. V. 15. No. 5. P. 1406–1420. doi: 10.1002/bbb.2244

6. Roy S., Ezati P., Rhim J.-Wh. Fabrication of antioxidant and antimicrobial pullulan/gelatin films integrated with grape seed extract and sulfur nanoparticles // *ACS Appl. Bio Mater.* 2022. V. 5. No. 5. P. 2316–2323. doi: 10.1021/acsbm.2c00148

7. Wahling A., De Konen A.A.P. Biopolymer cross-linking method // Patent RU 2 732 928 C1. Application: 2019142085, 14.07.2017. Date of publication: 24.09.2020 (in Russian).

8. Nemereshina O.N., Gusev N.F., Malkova T.L. Study of biologically active substances and antimicrobial activity of plantain leaves of lanceolate *Plantago lanceolata* // *Bashkirskiy khimicheskij zhurnal*. 2014. V. 21. No. 4. P. 133–142 (in Russian).

9. Lebedeva D.D., Trusov N.A., Solomonova E.V., Nozdrina T.D., Meer T.P. Prospects of using coniferous

plants of the Moscow Region as a biosafety source of ascorbic acid // *Vestnik Kurskoy gosudarstvennoy selskokhozyaystvennoy akademii*. 2018. No. 8. P. 31–35 (in Russian).

10. Fokina A.I., Skugoreva S.G., Trefilova L.V., Davrosvikh L.V. Determination of oxidative stress indicators in *Melissa officinalis* under the action of micromycete *Fusarium culmorum* and its antagonists // *Theoretical and Applied Ecology*. 2022. No. 2. P. 77–83 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-2-077-083

11. Fedoseeva L.M., Kutateladze G.R. Study of some phenolic compounds of the aboveground part of sour sorrel, developing in the Altai Territory // *Khimiya Rastitel'nogo Syrya*. 2017. No. 9. P. 91–96 (in Russian). doi: 10.14258/jcprm.2017041861

12. Maksimova T.V., Nikulina I.N., Pakhomov V.P., Shkarina E.I., Chumakova Z.V., Arzamastsev A.P. Method for determining antioxidant activity // Patent RU 2170930 C1. Application: 200011126/14. Date of publication: 20.07.2001 (in Russian).

13. Shleykin A.G., Shatalov I.S., Shatalova A.S. The effect of transglutaminase on the mechanical characteristics of packaging material based on gelatin // *Scientific journal NRU ITMO. Series “Processes and apparatuses of food production”*. 2014. No. 2 [Internet resource] <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-transglutaminazy-namehanicheskie-harakteristiki-upakovochnogo-materiala-na-osnove-zhelatina> (Accessed: 26.06.2023) (in Russian).

14. Kovyazina N.A. Study of the physicochemical properties of films of medicinal SEXTOPHAG // *Bulletin of VSU. Series: Chemistry. Biology. Pharmacy*. 2022. No. 1. P. 78–84 (in Russian).

15. Takó M., Kerekes E.B., Zambrano C., Kotogán A., Papp T., Krisch J., Vágvölgyi C. Plant phenolics and phenolic-enriched extracts as antimicrobial agents against food-contaminating microorganisms // *Antioxidants*. 2020. V. 9. No. 2. Article No. 165. doi: 10.3390/antiox9020165

16. Trineeva O.V., Rudaya M.A., Gudkova A.A., Slivkin A.I. Application of IR spectroscopy in the analysis of medicinal plant materials // *Bulletin of VSU. Series: Chemistry. Biology. Pharmacy*. 2018. No. 4. P. 187–194 (in Russian).

17. Yampolskaya G.P., Tarasevich B.N., Elenskiy A.A. Secondary structure of globular proteins in adsorption layers at the solution-air phase boundary according to fourier transform IR spectroscopy data // *Colloid Journal*. 2005. V. 67. No. 3. P. 426–432 (in Russian).

18. Cerqueira M.A., Souza B.W., Teixeira J.A., Vicente A.A. Effect of glycerol and corn oil on physicochemical properties of polysaccharide films: a comparative study // *Food Hydrocolloids*. 2012. V. 27. No. 1. P. 175–184.

19. Shankar S., Teng X., Li G., Rhim J.W. Preparation, characterization, and antimicrobial activity of gelatin/ZnO nanocomposite films // *Food Hydrocolloids*. 2015. V. 45. P. 264–271.

20. Nilsuwan K., Benjakul S., Prodpran T. Properties and antioxidative activity of fish gelatin-based film incorporated with epigallocatechin gallate // *Food*

Hydrocolloids. 2018. V. 80. P. 212–221. doi: 10.1016/j.foodhyd.2018.01.033

21. Luo M., Cao Y., Wang W., Chen X., Cai J., Wang L., Xiao J. Sustained-release antimicrobial gelatin film: effect of chia mucilage on physicochemical and antimicrobial properties // Food Hydrocolloids. 2019. V. 87. P. 783–791. doi: 10.1016/j.foodhyd.2018.09.010

22. Amjadi S., Emaminia S., Heyat Davudian Sh., Pourmohammad S., Hamishehkar H., Roufegarinejad L. Preparation and characterization of gelatin-based nanocomposite containing chitosan nanofiber and ZnO nanoparticles // Carbohydrate Polymers. 2019. V. 216. P. 376–384. doi: 10.1016/j.carbpol.2019.03.062

23. Xu M., Yu X., Chen X., Yuan G. Physico-chemical, biological properties of films based on chitosan/gelatin with finger bran extract // Food Measure. 2022. V. 16. P. 2939–2947. doi: 10.1007/s11694-022-01406-1

24. Kavusi G., Dadfar S.M.M., Purfard A.M. Mechanical, physical, antioxidant and antimicrobial properties of thymol-containing gelatin films for potential use as nano-layering for wounds // Journal of Food Science. 2013. V. 78. No. 2. P. 244–250.

25. Irzhak V.I., Korolev G.V., Solovov M.E. Intermolecular interaction in polymers and the physical network model // Uspekhi Khimii. 1997. V. 66. No. 2. P. 179–200 (in Russian).

26. Nastasi J.R., Kontogiorgos V., Daygon V.D., Fitzgerald M.A. Pectin-based films and coatings with plant extracts as natural preservatives: A systematic review // Trends in Food Science & Technology. 2022. V. 120. P. 193–211. doi: 10.1016/j.tifs.2022.01.01

27. Wang H., Wang L. Developing a bio-based packaging film from soya by-products incorporated with valonea tannin // Journal of Cleaner Production. 2017. V. 143. P. 624–633.

28. Nie X., Zhao L., Wang N., Meng X. Phenolics-protein interaction involved in silver carp myofibrillar protein films with hydrolysable and condensed tannins // LWT – Food Science and Technology. 2017. V. 81. P. 258–264.

29. Rudnik E. Compostable polymer materials. Second Edition. Elsevier, 2019. 410 p. doi: 10.1016/C2012-0-07075-5