

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-3-2595>
<https://elibrary.ru/BLIWNU>

Оригинальная статья
<https://fptt.ru>

ПИЩЕВЫЕ ПЛЕНКИ НА ОСНОВЕ ЖЕЛАТИНА ИЗ КОЖИ ХОЛОДНОВОДНЫХ РЫБ И АЛЬГИНАТА НАТРИЯ: РАЗРАБОТКА И ХАРАКТЕРИСТИКА



Д. С. Колотова*^{ID}, В. В. Бордиян^{ID},
Е. В. Боровинская, С. О. Воропаева^{ID}

Мурманский арктический университет^{ROR}, Мурманск, Россия

Поступила в редакцию: 26.03.2025
Принята после рецензирования: 06.05.2025
Принята к публикации: 03.06.2025

*Д. С. Колотова: kolotovads@mauniver.ru,
<https://orcid.org/0000-0002-1700-2323>
В. В. Бордиян: <https://orcid.org/0009-0004-5680-8882>
С. О. Воропаева: <https://orcid.org/0009-0008-0230-2690>

© Д. С. Колотова, В. В. Бордиян, Е. В. Боровинская,
С. О. Воропаева, 2025



Аннотация.

Негативное влияние на окружающую среду синтетических упаковочных материалов для хранения пищевых продуктов стимулирует разработку биоразлагаемых альтернатив из возобновляемого природного сырья. Одним из перспективных направлений является разработка пищевых пленок на основе комбинаций желатина из отходов рыбного промысла и альгината натрия из морских водорослей, что позволяет сочетать экологические преимущества с функциональными характеристиками, необходимыми для применения в пищевой промышленности. Целью данной работы являлись разработка и составление физико-химической характеристики пищевых пленок на основе желатина из кожи холодноводных рыб и альгината натрия в зависимости от их соотношения, а также подбор типа и концентрации пластификатора для дальнейшего применения в качестве упаковочного материала для безопасного и пролонгированного хранения пищевых продуктов.

Для создания пищевых пленок использовались смеси желатина из кожи холодноводных рыб и альгината натрия из бурых водорослей с добавками глицерина и сорбитола в качестве пластификаторов. Варьировали содержание рыбного желатина и альгината натрия, а также пластификаторов. У полученных пленок определяли толщину, содержание влаги, паропроницаемость, влагопоглощение, прочность на разрыв и гибкость, а также термические свойства. Для анализа структуры, свойств и термической устойчивости применяли оптическую микроскопию, ИК-спектроскопию и дифференциальную сканирующую калориметрию. Полученные данные подвергались статистической обработке с использованием *t*-критерия Стьюдента.

Установлено оптимальное соотношение компонентов в системе, обеспечивающее формирование пленок с улучшенными механическими и барьерными характеристиками, включая сниженную гигроскопичность и паропроницаемость, а также высокие температуры плавления (135–138 °С). В случае использования в качестве пластификатора сорбитола пленки характеризовались более однородной структурой и, как следствие, более низкими значениями паропроницаемости (829–1122 г/м²) и влагопоглощения (не более 98 %), а также более высокой прочностью при разрыве. Введение глицерина в состав пленок способствует повышению их пластифицирующих характеристик, однако сопровождается ростом паропроницаемости (1572–1895 г/м²) и влагопоглощения (114–179 %).

Установленные закономерности и полученные экспериментальные данные могут послужить основой для управления свойствами биополимерных композиций посредством варьирования природы пластификаторов, концентрации и соотношения компонентов в системе, что позволит разрабатывать пищевые пленки с улучшенными механическими характеристиками и пониженной гигроскопичностью.

Ключевые слова. Биоразлагаемые пищевые пленки, хранение, рыбный желатин, альгинат натрия, ИК-спектроскопия, дифференциальная сканирующая калориметрия

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 23-73-01233.

Для цитирования: Колотова Д. С., Бордиян В. В., Боровинская Е. В., Воропаева С. О. Пищевые пленки на основе желатина из кожи холодноводных рыб и альгината натрия: разработка и характеристика. Техника и технология пищевых производств. 2025. Т. 55. № 3. С. 567–580. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-3-2595>

Edible Gelatin Films from Cold Water Fish Skin and Sodium Alginate



Daria S. Kolotova*^{ID}, Vlada V. Bordiyan^{ID},
Ekaterina V. Borovinskaya, Svetlana O. Voropaeva^{ID}

Murmansk Arctic University^{ROR}, Murmansk, Russia

Received: 26.03.2025

Revised: 06.05.2025

Accepted: 03.06.2025

Daria S. Kolotova: kolotovads@mauniver.ru,

<https://orcid.org/0000-0002-1700-2323>

Vlada V. Bordiyan: <https://orcid.org/0009-0004-5680-8882>

Svetlana O. Voropaeva: <https://orcid.org/0009-0008-0230-2690>

© D.S. Kolotova, V.V. Bordiyan, E.V. Borovinskaya, S.O. Voropaeva, 2025



Abstract.

Synthetic food packaging remains a looming environmental hazard. Biodegradable alternatives from renewable natural raw materials may be a solution to this problem. Edible packaging films can be produced from fish waste gelatin and seaweed sodium alginate. They combine environmental benefits with the functional characteristics required by the food industry. This article introduces a new environmentally friendly packaging film and its physicochemical profiles depending on the ratio of cold-water fish waste and sodium alginate. The experiment also included selecting the optimal type and concentration of plasticizer for safe and long food storage. The experimental films consisted of different mixes of cold-water fish skin gelatin, brown algae sodium alginate, and glycerol or sorbitol. The films were tested for thickness, moisture content, vapor permeability, moisture absorption, tensile strength, flexibility, and thermal properties. Optical microscopy, IR spectroscopy, and differential scanning calorimetry made it possible to analyze the structure, physicochemical properties, and thermal stability. The statistical processing relied on the Student's *t*-test method. An optimal ratio of components yielded films with improved mechanical and barrier properties, low hygroscopicity, low vapor permeability, and high melting temperatures (135–138 °C). The samples with sorbitol as plasticizer demonstrated a more uniform structure, resulting in low vapor permeability (829–1,122 g/m²), reduced moisture absorption (≤ 98%), and high tensile strength. The samples with glycerol had better plasticizing properties, but higher vapor permeability (1,572–1,895 g/m²) and moisture absorption (114–179%).

The established patterns may help to control the properties of industrial biopolymer compositions by adjusting the type of plasticizer and the concentration and ratio of components to obtain novel food films with improved mechanical characteristics and low hygroscopicity.

Keywords. Biodegradable edible films, storage, fish gelatin, sodium alginate, IR spectroscopy, differential scanning calorimetry

Funding. The research was supported by the Russian Science Foundation, project no. 23-73-01233.

For citation: Kolotova DS, Bordiyan VV, Borovinskaya EV, Voropaeva SO. Edible Gelatin Films from Cold Water Fish Skin and Sodium Alginate. Food Processing: Techniques and Technology. 2025;55(3):567–580. (In Russ.) <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-3-2595>

Введение

В последние годы проблема использования традиционных синтетических упаковочных материалов для хранения пищевых продуктов становится все более острой в связи с их негативным влиянием на окружающую среду. Для ее решения активно стимулируется развитие исследований в области создания биоразлагаемых упаковочных материалов на основе возобновляемых природных ресурсов [1–4].

Разработка биоразлагаемых пленок на основе комбинаций белков и полисахаридов привлекает значительное внимание благодаря созданию материалов с улуч-

шенными функциональными характеристиками [5, 6]. Данный вид пленок на основе биополимеров играет решающую роль в снижении негативного воздействия небiorазлагаемых пластиковых отходов на окружающую среду [7]. Наиболее распространенными биополимерами, которые используются при создании биоразлагаемых пленок, являются полисахариды и белки: хитозан [8–12], карбоксиметилцеллюлоза [13–15], крахмал [16–17], соевый белок [18], молочные белки, такие как казеин и сывороточный альбумин [19], а также желатин [20–23]. Исследования показывают, что такие бикомпонентные системы обладают синергети-

ческим эффектом: белки обеспечивают механическую прочность, а полисахариды – барьерные свойства и биосовместимость.

Одним из перспективных направлений является разработка пленок на основе рыбного желатина [24]. Данный вид желатина, получаемый из отходов рыбного промысла, представляет собой возобновляемый источник белка с хорошими пленкообразующими свойствами [25, 26]. Желатин получил наиболее широкое распространение благодаря хорошим функциональным свойствам и возможности выступать в качестве внешнего барьера для защиты пищевых продуктов от высыхания, порчи, воздействия кислорода и света [27]. Пленки, состоящие из этого материала, обладают хорошими механическими свойствами, но оказываются чувствительны к влаге и обладают низкими барьерными свойствами по отношению к водяному пару [28]. Это существенно ограничивает его использование для хранения пищевых продуктов с высоким содержанием влаги, поскольку пленки могут растворяться, набухать или разрушаться при контакте с водой. Современные тенденции в разработке биоразлагаемых материалов для упаковки пищевых продуктов направлены на оптимизацию свойств желатиновых пленок путем введения различных модификаторов.

Первый тип модификаторов – это вещества, которые добавляют к биополимерным материалам для регулирования их функциональных свойств за счет повышения гибкости, эластичности, жесткости и механических свойств [22]. В работах [29, 30] показано, что полиолы особенно эффективны для пластификации гидрофильных полимеров. По этой причине многие недавние исследования направлены на использование полиолов, таких как глицерин [31], сорбит [32], маннит [33], и ксилит [34]. Таким образом, добавление пластификаторов направлено на устранение хрупкости пленок, на повышение их гибкости и прочности, а также на предотвращение растрескивания пленочного материала во время упаковки и транспортировки. Тип, состав пластификатора и его совместимость с полимером могут влиять на взаимодействие между пластификатором и полимером, в том числе на его способность притягивать воду к пластифицированным белковым пленкам [35]. Пластификаторы, характеризующиеся небольшими размерами молекул, высокой полярностью, наличием большого количества полярных групп на молекулу, и большим расстоянием между полярными группами внутри молекулы, как правило, оказывают более сильное пластифицирующее воздействие на полимерную систему. Выбор пластификатора для конкретной системы обычно основывается на его совместимости, стабильности и желаемых физических свойствах пленок [36].

Также в качестве модификаторов желатиновых пленок могут выступать полисахариды, поскольку они нетоксичны, съедобны и широко распространены в природе [37]. В них присутствуют свободные гидрок-

сильные группы, которые инициируют образование водородных связей с добавленными активными веществами. Покрытия, содержащие полисахариды, обладают хорошими барьерными свойствами по отношению к кислороду, а также отличными прочностными характеристиками. Добавление дополнительных антимикробных агентов и антиоксидантов в упаковочные материалы может увеличить срок хранения пищевых продуктов [38]. В частности, хитозан продемонстрировал хорошие противомикробные и противогрибковые свойства, и может использоваться в качестве противомикробного агента совместно с другими пленкообразующими биополимерами [39]. Пуллулан, геллан и ксантан представляют собой полисахариды микробного происхождения, продуцируемые высокоселективными бактериями. В работе S. A. A. Mohamed *et al.* [40] показано, что пленки и покрытия на основе таких полисахаридов также увеличивают срок годности пищевых продуктов. Альгинат, агар и каррагинан являются природными полисахаридами морского происхождения. Каррагинан из красных водорослей может применяться при создании пленок для хранения мяса, птицы и рыбы [37]. Авторами [39] установлено, что альгинат, извлеченный из бурых морских водорослей, проявил низкие водобарьерные свойства. Однако при добавлении ионов кальция улучшились общие водобарьерные свойства пленки, благодаря чему она стала нерастворимой в воде.

L. Dou *et al.* [41] успешно изготовили пленки на основе желатина с альгинатом натрия, содержащие чайные полифенолы в качестве сшивающих агентов и антиоксидантов. Пленки, модифицированные чайными полифенолами, показали лучшую механическую, физическую и антиоксидантную активность, чем те, которые без них. Добавление данных полифенолов приводило к межмолекулярному взаимодействию, что подтверждалось данными ИК-Фурье спектроскопии. Кроме того, они обладали хорошей антиоксидантной эффективностью, что способствовало предотвращению окисления липидов.

В работе [42] показано, что применение пленки на основе желатина и альгината натрия, обогащенной экстрактом кожуры свеклы для упаковки сырого говяжьего фарша привело к повышению качественных показателей при хранении продукта при температуре 4 °С. Включение экстракта кожуры свеклы улучшило механические, физические и биологические характеристики. Обогащенные пленки с содержанием экстракта кожуры свеклы отличались высокой эффективностью в отношении замедления окисления белков и липидов. Кроме того, они стабилизировали цвет мяса и замедлили рост микробов, тем самым продлив срок годности мяса.

Авторы исследования [43] разработали композитную пленку с применением желатина и альгината натрия как матрицы и экстракта зеленого чая в качестве сшивающего агента и активного ингредиента.

Смешанная пленка обладала устойчивостью к действию УФ-излучения, высокой механической прочностью, влагостойкостью и термостойкостью. Высокая антибактериальная активность пленки обусловлена медленным высвобождением экстракта зеленого чая из композитной пленки. Она увеличила сроки хранения продуктов до 7 дней, демонстрируя высокий потенциал ее использования в области упаковки пищевых продуктов. Таким образом, альгинат натрия из бурых водорослей характеризуется хорошими барьерными свойствами [44].

Следует отметить, что разработка биоразлагаемых пленок на основе рыбного желатина и альгината натрия является перспективным направлением, сочетающим экологические преимущества с функциональными характеристиками, необходимыми для применения в пищевой промышленности. Кроме того, данные биополимеры решают проблему рационального потребления морских биоресурсов.

Цель работы – разработка и составление физико-химической характеристики пищевых пленок на основе желатина из кожи холодноводных рыб и альгината натрия в зависимости от их соотношения, а также подбор типа и концентрации пластификатора для дальнейшего применения в качестве упаковочного материала для безопасного и пролонгированного хранения пищевых продуктов.

Объекты и методы исследования

Важным критерием при создании пищевых пленок является безопасность и биоразлагаемость компонентов, входящих в их состав. В качестве основы для получения пленок использовали желатин из кожи холодноводных рыб (G 7041, Sigma, Канада) и альгинат натрия из бурых водорослей (A2033, Sigma, Великобритания). Значения средневязкостной молекулярной массы биополимеров – 130 и 507 кДа соответственно. Отдельно подготовили растворы желатина и альгината натрия – для этого предварительно дали им набухнуть при комнатной температуре в течение 1 и 5 ч соответственно, после чего вещества растворяли в воде при постоянном перемешивании при температурах 25 и 45 °С соответственно.

В качестве пластификаторов применяли компоненты, полученные из сырья растительного происхождения: глицерин дистиллированный пищевой ПК-94 (E422, «Glycerine.ru» LTD, Россия) с содержанием основного вещества не менее 99 % и сорбитол пищевой (E420, Shandong Lujian Biological Technology Co. Ltd., Китай) с содержанием основного вещества не менее 96 %. Глицерин и сорбитол растворяли в дистиллированной воде при комнатной температуре и постоянном перемешивании.

Приготовление пленок. Растворы альгината натрия, желатина и пластификаторов необходимого объема добавляли в химические стаканы и тщательно перемешивали при помощи верхнеприводной мешалки при температуре 45 °С. Содержание желатина в смеси

составило 4, 3 и 2 масс. %, содержание пластификатора – 10 и 20 масс. %. Массовое соотношение альгината натрия и желатина составило 0,5; 0,7 и 1,0 г/г. Обозначение образцов с различным соотношением компонентов приведено в таблице 1. Готовые смеси помещали в эксикатор и проводили дегазацию под вакуумом в течение 5 ч для удаления пузырьков воздуха. Затем биополимерные смеси массой $4,0 \pm 0,2$ г заливали в силиконовые формы квадратной ($4,5 \times 4,5$ см) и овальной ($d = 5$ см) формы глубиной 3 мм и помещали в сушильный шкаф на 12 ч при температуре $45,0 \pm 0,1$ °С. Пленки аккуратно извлекали из силиконовых форм и хранили при комнатной температуре в темном и сухом месте.

Толщину готовых пленок вычисляли в 10 различных точках при помощи цифрового микрометра REXBETI (Китай) с погрешностью измерений 0,001 мм и рассчитывали среднее значение для каждого состава.

Содержание влаги определяли путем сушки образцов пленок в сушильном шкафу при 105 °С до постоянной массы. Содержание влаги (W , %) рассчитывали по формуле:

$$W = \frac{m_1 - m_0}{m_0 - m} \times 100 \quad (1)$$

Таблица 1. Обозначение и состав образцов

Table 1. Sample number and composition

№ образца	Содержание желатина, масс. %	Массовое соотношение альгината натрия и желатина, г/г	Пластификатор, масс. %		
			Сорбитол	Глицерин	
1	4	0,5	10	–	
2		0,7			
3		1,0			
4		0,5	–		10
5		0,7			
6		1,0			
7	3	0,5	10	–	
8		0,7			
9		1,0			
10		0,5	–		10
11		0,7			
12		1,0			
13	2	0,5	10	–	
14		0,7			
15		1,0			
16		0,5	–		10
17		0,7			
18		1,0			
19	2	0,5	20	–	
20		0,7			
21		1,0			
22		0,5	–		20
23		0,7			
24		1,0			

где m – масса пустого бюкса с крышкой, г; m_1 – масса бюкса с крышкой и образцом, г; m_0 – масса бюкса с крышкой и образцом после сушки, г.

Механические испытания пленок на разрыв проводили с использованием испытательной машины ZP-500, оснащенной динамометром с предельной нагрузкой 500 Н и электронным датчиком хода (рис. 1).

Для испытаний выбрали образцы пленок размером 1,5 см в ширину и 4,5 см в длину. Исследование прочностных свойств пленок проводили в соответствии с ГОСТ Р 35226-2008 «Полотна нетканые. Методы определения прочности», выполняя три параллельных испытания. Для определения гибкости и хрупкости пленки сгибали пополам. Если она легко сгибалась пополам, результат испытания обозначали как «+» в графе «гибкость», если ломалась или крошилась, то «+» в графе «хрупкость».

Влагопоглощение пленок измеряли путем выдерживания высушенных образцов в эксикаторе со 100 % влажностью в течение 96 ч при температуре 25 °С с последующим взвешиванием. Влагопоглощение (X , %) рассчитывали по формуле:

$$X = \frac{m_w}{m_0} \times 100 \quad (2)$$

где m_w – масса влаги, поглощенной образцом через время t , г; m_0 – масса высушенной пленки, г.

Паропроницаемость пленок исследовали гравиметрическим методом, основанном на определении количества водяного пара, проходящего через материал, в соответствии с ГОСТ 21472-81 «Материалы листовые. Гравиметрический метод анализа». Для этого образцы пленок закрепляли на горлышках пробирок объемом 4 мл и диаметром 1,5 см, в которые предва-



Рисунок 1. Образец пленки, подготовленный к испытанию на растяжение и разрыв с использованием испытательной машины ZP-500

Figure 1. Film sample prepared for tensile and tear testing in a ZP-500 tester

рительно помещали по 1 мл дистиллированной воды. Взвешивали пробирки с водой и пленками, после чего помещали в эксикатор и выдерживали при температуре 25 °С в течение 96 ч. Взвешивание пробирок проводили через 3, 24, 48 и 96 ч. Паропроницаемость пленок (VP , г/м²) рассчитывали по формуле:

$$VP = \frac{10 \times \Delta m}{S} \quad (3)$$

где Δm – изменение массы пробирки за время t , г; S – испытываемая площадь образца, м².

Поверхность пленок исследовали методом оптической микроскопии с использованием микроскопа CX43 (Olympus, Япония) при 10-кратном увеличении в темном поле.

Инфракрасные спектры. Спектры пропускания пленок регистрировали с использованием инфракрасного спектрометра с Фурье-преобразованием ФСМ 2202 (Инфраспек, Россия) в диапазоне частот 4000–600 см⁻¹ (количество сканирований – 50) с разрешением 4 см⁻¹. Образцы пленок измельчали и смешивали с KBr в соотношении 1/15 (масса образца / масса KBr), высушивали при температуре 60 °С в течение суток для удаления влаги, после чего готовили таблетки с использованием гидравлического пресса. В качестве образца сравнения использовали таблетки, изготовленные из чистого KBr. Проводили сравнение полученных спектров пленок со спектрами, полученными для чистых образцов рыбного желатина и альгината натрия.

Термический анализ. Термические свойства пленок исследовали методом дифференциальной сканирующей калориметрии посредством дифференциального сканирующего калориметра DSC 214 Polyma (Netzsch GmbH, Германия), оснащенным сенсором Corona (термопара E-типа) и системой охлаждения жидким азотом. Перед измерениями прибор калибровали по пяти стандартным материалам в алюминиевых тиглях с проколотой крышкой (C₁₀H₁₆, In, Sn, Bi, Zn) в соответствии со стандартом ASTM E967–18. Образец пленки массой 11–12 мг вырезали по форме тигля, плотно укладывали в алюминиевый тигель с проколотой крышкой. В качестве образца сравнения использовали аналогичный пустой тигель. Образцы исследовали в токе азота (скорость подачи – 25 мл/мин) по следующей программе: начало при 30 °С; охлаждение до –100 °С со скоростью 10 °С/мин; нагрев до 150 °С со скоростью 10 °С/мин; повтор цикла охлаждения до –100 °С и нагрева до 150 °С со скоростью 10 °С/мин. Погрешность измерения энтальпии составляет менее 1 % от измеренного значения.

Обработка результатов. Статистическую обработку данных проводили в программной среде Microsoft Office с использованием t -критерия Стьюдента при доверительной вероятности $P = 95$ %. Полученные значения выражали как среднее значение трех измерений со стандартным отклонением.

Результаты и их обсуждение

Органолептические свойства пленок. Внешний вид готовых пленок представлен на рисунке 2. Пленки представляют собой однородные прозрачные глянцевые покрытия с желтоватым оттенком различной интенсивности в зависимости от концентрации альгината натрия и типа пластификатора.

Поскольку толщина пленок во многом определяет их механическую прочность, паропроницаемость и прозрачность, были определены значения толщины изготовленных образцов (табл. 2). При содержании пла-

стификатора 10 масс. % их толщина составляет около 0,2 мм для всех составов, увеличиваясь примерно в 1,5–2 раза (до 0,3–0,4 мм) при содержании пластификатора 20 масс. %. Показатель влажности в пленках на основе сорбитола варьировался от 3,1 до 5,6 %, что существенно ниже значений, полученных для пленок на основе глицерина, которые лежали в диапазоне от 9,8 до 22,5 % (табл. 2). Такое различие может быть связано с более гидрофильной природой глицерина, которая увеличила сродство пленок к воде и ухудшила их гигроскопические характеристики.

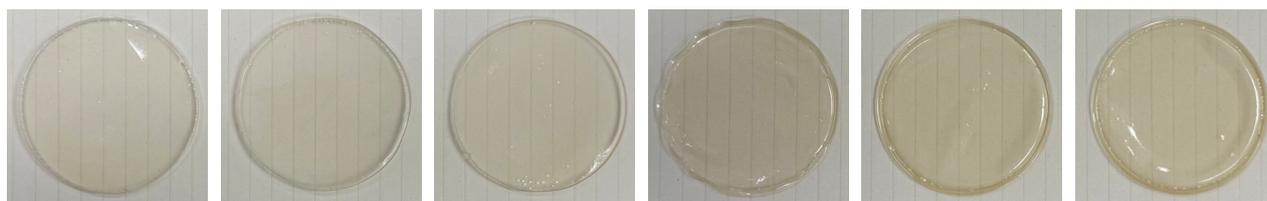


Рисунок 2. Внешний вид 6 образцов пленок

Figure 2. Appearance of six experimental samples

Таблица 2. Содержание влаги и толщина пленок

Table 2. Moisture content and thickness

№ образца	Состав	Содержание влаги, %	Толщина пленки, мм
1	4 % РЖ + 2 % АН + 10 % С	5,1 ± 0,3	0,19 ± 0,03
2	4 % РЖ + 2,8 % АН + 10 % С	5,3 ± 0,2	0,21 ± 0,02
3	4 % РЖ + 4 % АН + 10 % С	5,6 ± 0,2	0,29 ± 0,04
4	4 % РЖ + 2 % АН + 10 % Г	12,2 ± 0,5	0,21 ± 0,02
5	4 % РЖ + 2,8 % АН + 10 % Г	14,9 ± 0,5	0,23 ± 0,02
6	4 % РЖ + 4 % АН + 10 % Г	9,8 ± 0,5	0,28 ± 0,02
7	3 % РЖ + 1,5 % АН + 10 % С	4,2 ± 0,3	0,22 ± 0,02
8	3 % РЖ + 2,1 % АН + 10 % С	4,6 ± 0,3	0,21 ± 0,01
9	3 % РЖ + 3 % АН + 10 % С	5,5 ± 0,2	0,20 ± 0,01
10	3 % РЖ + 1,5 % АН + 10 % Г	14,4 ± 0,4	0,14 ± 0,02
11	3 % РЖ + 2,1 % АН + 10 % Г	12,5 ± 0,5	0,17 ± 0,02
12	3 % РЖ + 3 % АН + 10 % Г	10,1 ± 0,5	0,24 ± 0,02
13	2 % РЖ + 1 % АН + 10 % С	4,2 ± 0,3	0,19 ± 0,01
14	2 % РЖ + 1,4 % АН + 10 % С	4,1 ± 0,2	0,19 ± 0,01
15	2 % РЖ + 2 % АН + 10 % С	4,9 ± 0,3	0,20 ± 0,01
16	2 % РЖ + 1 % АН + 10 % Г	9,6 ± 0,5	0,11 ± 0,02
17	2 % РЖ + 1,4 % АН + 10 % Г	22,5 ± 0,6	0,12 ± 0,02
18	2 % РЖ + 2 % АН + 10 % Г	20,3 ± 0,5	0,21 ± 0,03
19	2 % РЖ + 1 % АН + 20 % С	3,1 ± 0,3	0,34 ± 0,04
20	2 % РЖ + 1,4 % АН + 20 % С	3,3 ± 0,2	0,38 ± 0,02
21	2 % РЖ + 2 % АН + 20 % С	3,9 ± 0,3	0,38 ± 0,02
22	2 % РЖ + 1 % АН + 20 % Г	10,5 ± 0,5	–
23	2 % РЖ + 1,4 % АН + 20 % Г	12,5 ± 0,5	–
24	2 % РЖ + 2 % АН + 20 % Г	19,7 ± 0,6	0,32 ± 0,02

Примечание: РЖ – рыбный желатин, АН – альгинат натрия, С – сорбитол, Г – глицерин. Все данные представлены как среднее значение трех повторных экспериментов ± стандартное отклонение при доверительной вероятности $P = 95\%$. Средние значения в столбцах не имеют значимых различий ($p > 0,05$).

Note: РЖ – fish gelatin, АН – sodium alginate, С – sorbitol, Г – glycerol. The data are represented as a mean of three experiments with standard deviation at a confidence level of $P = 95\%$. The mean values in the columns have no significant differences ($p > 0.05$).

Механические свойства пленок. Значения прочности на разрыв и удлинения при разрыве являются важными характеристиками упаковочных материалов для пищевых продуктов и влияют на способность пленок сопротивляться внешнему воздействию и сохранять целостность и барьерные свойства при транспортировке и хранении пищевых продуктов.

Результаты испытаний механической прочности образцов приведены в таблице 3. Установлено, что пленки, в состав которых входил сорбитол, характеризовались меньшими значениями удлинения при разрыве, т. е. пластичностью, и большим пределом прочности, по сравнению с теми, которые получили при помощи глицерина. Образцы пленок, пластифицированные глицерином, обладали более высокой пластичностью и растяжимостью. Молекулы глицерина характеризуются небольшим размером, они легче проникают между полимерными цепями, ослабляя взаимодействие между полимерными материалами, увеличивая гибкость и растяжимость пленок [45].

Увеличение содержания пластификатора с 10 до 20 % ухудшало механические свойства пленок: сорбитол делал их более хрупкими, а глицерин – слишком мягкими для испытаний на разрыв. С ростом массового соотношения альгинат натрия и желатина во всех случаях наблюдалось увеличение предела прочности и растяжимости пленок. Наибольшие значения прочности и удлинения при разрыве были получены для образцов с массовым соотношением альгината натрия и желатина – 1,0 г/г. Уменьшение количества желатина в смесях с 4 до 2 % приводило к ухудшению прочностных свойств. Таким образом, наиболее прочные и пластичные образцы пленок были получены при: содержание желатина – 4 %, массовое соотношение альгината натрия и желатина – 1,0 г/г, пластификатор – 10 %.

Паропроницаемость и влагопоглощение. Исследована паропроницаемость пленок гравиметрическим методом, основанном на определении количества водяного пара, проходящего через материал. Динамика паропроницаемости приведена на рисунке 3.

Установлено, что образцы с сорбитолом отличались более низкой паропроницаемостью: этот показатель, измеренный через 24 и 96 ч, варьировался от 120 до 270 г/м² и от 829 до 1122 г/м², соответственно. Для пленок с глицерином данные показатели изменялись в диапазоне 357–560 и 1572–1895 г/м² за 24 и 96 ч соответственно. Полученные результаты свидетельствуют о том, что пленки на основе глицерина характеризовались более высокой степенью аэрации и пористостью структуры. Аналогичные выводы сделаны в ряде работ [46–48], где установлено, что сорбитол придавал пленкам меньшую паропроницаемость, большую прочность и меньшую эластичность, по сравнению с глицерином. При этом увеличение содержания пластификатора с 10 до 20 % и массового соотношения биополимеров от 0,5 до 1,0 г/г желатина не оказывало существенного влияния на показатели паро-

проницаемости, что может быть связано с насыщением пластифицированной матрицы водой и практически постоянным потоком проходящего водяного пара [49]. Для пищевых пленок наиболее предпочтительны низкие показатели пропускаемости водяного пара, необходимые для обеспечения безопасного и длительного хранения пищевых продуктов [50].

Исследовано влагопоглощение образцов в условиях 100 % влажности в течение 96 ч (рис. 4). Пленки, содержащие сорбитол, обладали лучшими показателями, и влагопоглощение не превышало 98 %, в то время как для образцов, содержащих в качестве пластификатора глицерин, данный показатель варьировался в диапазоне от 114 до 176 %. Наблюдаемые различия могут быть связаны с более высокой гидрофильностью глицерина: он легче взаимодействует с водой посредством водородных связей. Кроме того, глицерин, из-за меньшего размера частиц, обладает значительной способностью взаимодействовать с цепочками

Таблица 3. Механические свойства пленок

Table 3. Mechanical properties

№ образца	Прочность на разрыв, МПа	Удлинение при разрыве, мм	Гибкость	Хрупкость
1	13,6 ± 0,5	2,6 ± 0,2	+	–
2	17,1 ± 0,4	5,2 ± 0,2	+	–
3	25,7 ± 0,4	9,1 ± 0,1	+	–
4	2,1 ± 0,5	28,6 ± 0,3	+	–
5	3,9 ± 0,5	20,2 ± 0,4	+	–
6	9,1 ± 0,5	14,2 ± 0,4	+	–
7	3,3 ± 0,4	0,4 ± 0,2	–	+
8	10,7 ± 0,3	3,6 ± 0,2	+	–
9	24,8 ± 0,2	4,8 ± 0,2	+	–
10	0,6 ± 0,3	47,6 ± 0,5	+	–
11	2,5 ± 0,3	15,8 ± 0,4	+	–
12	5,2 ± 0,4	24,2 ± 0,2	+	–
13	5,3 ± 0,3	0,1 ± 0,2	–	+
14	3,7 ± 0,3	0,3 ± 0,2	–	+
15	16,9 ± 0,2	0,5 ± 0,2	–	+
16	–	55,2 ± 0,5	+	–
17	0,8 ± 0,3	51,6 ± 0,5	+	–
18	1,0 ± 0,2	17,6 ± 0,2	+	–
19	7,2 ± 0,3	0,2 ± 0,1	–	+
20	9,7 ± 0,4	0,9 ± 0,2	–	+
21	17,4 ± 0,5	0,6 ± 0,2	–	+
22	–	–	–	–
23	–	–	–	–
24	–	59,6 ± 0,5	+	–

Примечание: Все данные представлены как среднее значение трех повторных экспериментов ± стандартное отклонение при доверительной вероятности $P = 95\%$. Средние значения в столбцах не имеют значимых различий ($p > 0,05$).

Note: The data are represented as a mean of three experiments with standard deviation at a confidence level of $P = 95\%$. The mean values in the columns have no significant differences ($p > 0.05$).

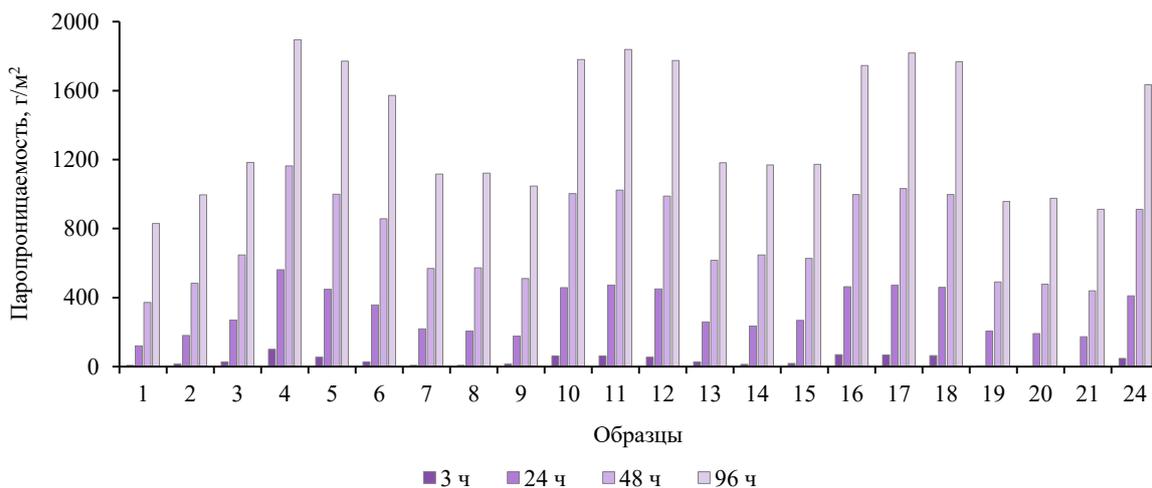


Рисунок 3. Динамика паропроницаемости пленок в течение 96 ч

Figure 3. Vapor permeability during 96 h

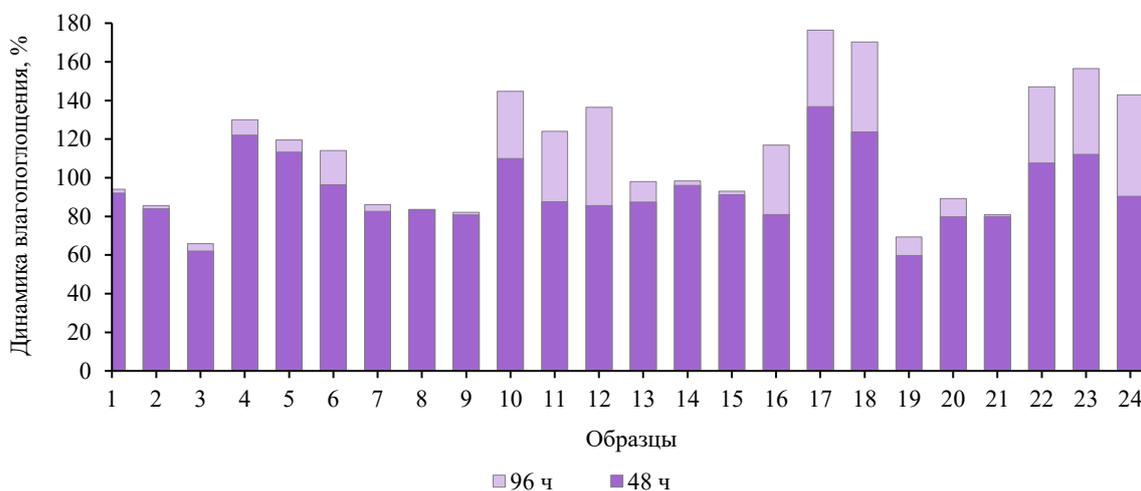


Рисунок 4. Динамика влагопоглощения пленок в течение 96 ч

Figure 4. Moisture absorption during 96 h

желатина, тем самым повышая молекулярную подвижность и увеличивая свободный объем внутри пленок. Таким образом, более гидрофильная природа глицерина и малый молекулярный вес усиливали сродство материалов, пластифицированных им, к воде [48]. Он также может снижать однородность структуры, что приводило к формированию пор и трещин в матрице и, как следствие, к увеличению поглощения влаги. Существенного влияния содержания пластификатора и массового соотношения биополимеров на показатели влагопоглощения пленок установлено не было.

Структура пленок. Примеры микрофотографий пленок приведены на рисунке 5. Образцы характеризовались неоднородной фибриллярной структурой. Наиболее однородным строением обладал образец № 3 (содержание желатина – 4 %, массовое соотношение альгината натрия и желатина – 1,0 г/г, коли-

чество сорбитола – 10 %), что согласуется с данными по паропроницаемости, влагопоглощению и прочности. Аналогичные результаты были получены для пленок на основе смесей крахмала и желатина [51]. В частности, пленки, содержащие глицерин, имели более шероховатую поверхность с порами или пустотами, в то время как пленки из сорбитола имели более однородную поверхность. Однако с ростом количества крахмала и снижением белка вне зависимости от типа пластификатора наблюдалась формирование более однородной поверхности.

Для исследования взаимодействия компонентов в исследуемых системах и понимания различий, проявляющихся в механических и физических свойствах пленок, были получены ИК-спектры для образцов № 1–6, так как данные образцы являлись наиболее перспективными для дальнейшего использования. ИК-

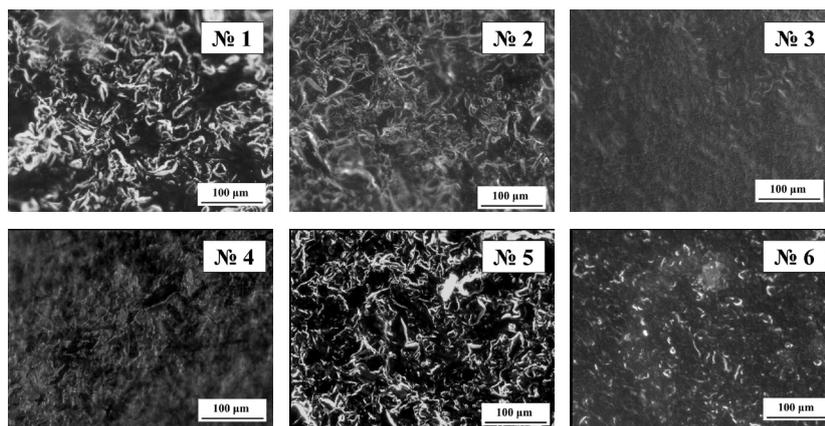


Рисунок 5. Микрофотографии пленок (увеличение $\times 10$)

Figure 5. Micrographs of experimental films ($\times 10$ magnification)

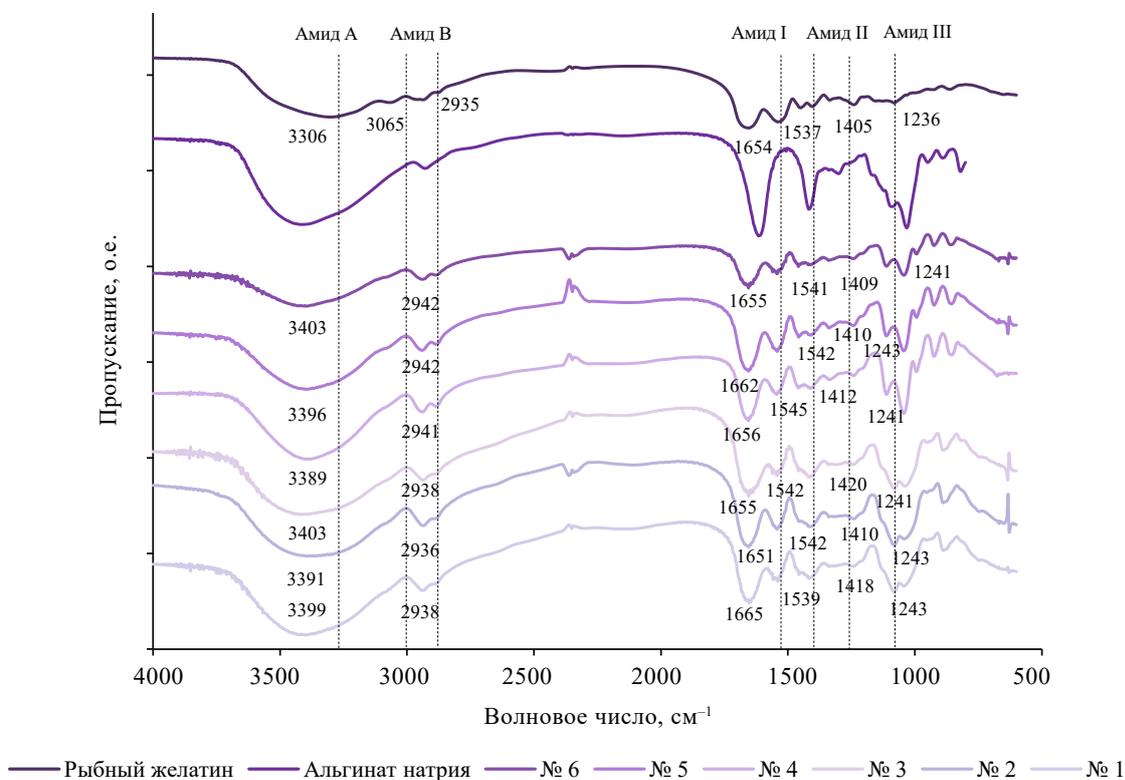


Рисунок 6. ИК-спектры пропускания рыбного желатина, альгината натрия и образцов пленок

Figure 6. IR spectra of fish gelatin, sodium alginate, and film samples

спектры чистых альгината натрия и рыбного желатина, а также пленок, пластифицированных сорбитолом и глицерином, представлены на рисунке 6. На ИК-спектрах присутствовала широкая полоса пропускания в диапазоне волновых чисел 3306–3403 cm^{-1} , которая соответствовала валентным колебаниям гидроксильных групп (Амид А), а также полоса в области 2935–2942 cm^{-1} , отвечающая колебаниям С-Н. Полосы пропускания в области 1654–1665 cm^{-1} , а также 1405–

1420 cm^{-1} , характерны для валентных колебаний асимметричных и симметричных карбоксильных групп. Также наблюдалось наличие полос пропускания в области 1236–1243 cm^{-1} (валентные колебания С-О) [52]. Спектры пленок имели практически аналогичные характерные полосы пропускания, что и чистые образцы альгината натрия и желатина, однако на полученных спектрах для пленок наблюдалось отсутствие пиков в области 3065 cm^{-1} (полоса Амид В, валентные колеба-

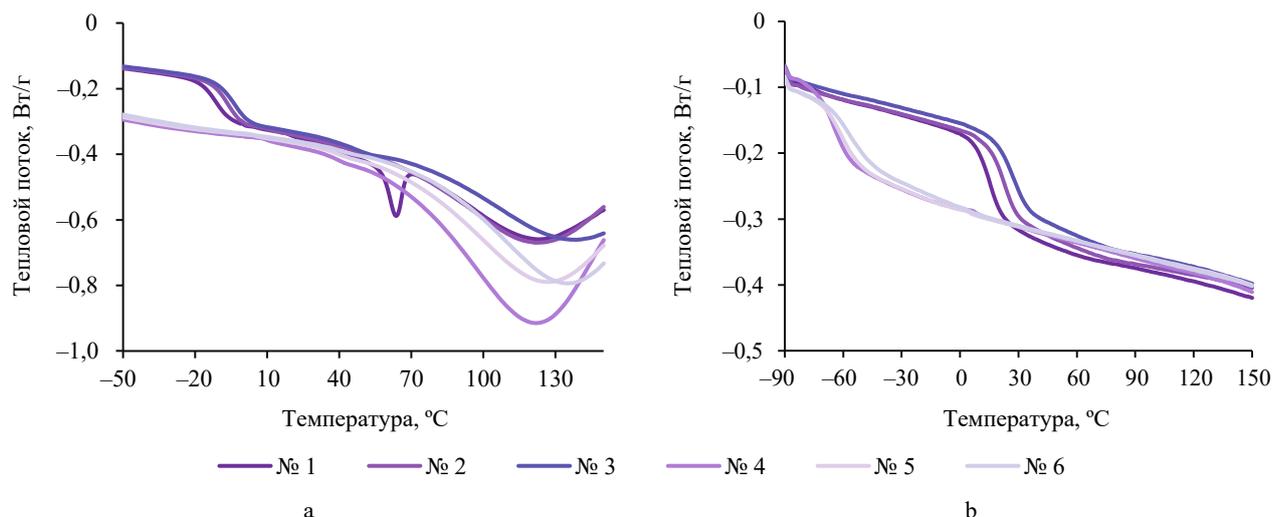


Рисунок 7. Термограммы образцов пленок, полученные при первом (а) и втором (б) сканировании

Figure 7. Thermograms of film samples after scan 1 (a) and 2 (b)

Таблица 4. Термические свойства пленок

Table 4. Thermal properties

№ образца	Состав	Температура плавления, °С	Температура стеклования, °С	
			1 сканирование	2 сканирование
1	4 % РЖ + 2 % АН + 10 % С	63,7 123,0	-12,0	15,8
2	4 % РЖ + 2,8 % АН + 10 % С	121,9	-7,7	22,6
3	4 % РЖ + 4 % АН + 10 % С	138,5	-4,8	25,7
4	4 % РЖ + 2 % АН + 10 % Г	122,0	-74,4	-63,5
5	4 % РЖ + 2,8 % АН + 10 % Г	127,1	-71,1	-60,1
6	4 % РЖ + 4 % АН + 10 % Г	134,8	-68,1	-54,5

Примечание: РЖ – рыбный желатин, АН – альгинат натрия, С – сорбитол, Г – глицерин.

Note: РЖ – fish gelatin, АН – sodium alginate, С – sorbitol, Г – glycerol.

ния N-H), а также смещение полосы Амид А в сторону более высоких волновых чисел, что указывало на образование межмолекулярных связей между молекулами биополимеров [53]. При этом чем больше альгината натрия содержится в системе, тем сильнее смещаются характеристические полосы.

Термические свойства. Исследованы термические свойства образцов пленок, характеризующихся наиболее высокими показателями прочности, а также более низкими значениями паропроницаемости и влагопоглощения (образцы № 1–3) и образцов аналогичного состава, в которых в качестве пластификатора был использован глицерин (№ 4–6). Термограммы приведены на рисунке 7.

На термограммах первого цикла нагрева (рис. 7а) наблюдались переходы стеклования, за которыми следовали широкие эндотермические пики плавления. Наличие данных тепловых эффектов связывали с наложением друг на друга различных процессов, таких как испарение воды, плавление и перекристаллизация

мелких и / или несовершенных кристаллитов желатина, а также с переходом в стеклообразное состояние блоков α -аминокислот в полипептидной цепи желатина [49]. Температура стеклования пленок с сорбитолом увеличивались с ростом массового соотношения альгината натрия и желатина от 0,5 до 1,0 г/г с $-12,0$ до $-4,8$ °С соответственно. Для пленок на основе глицерина переход стеклования наблюдается в диапазоне температур от $-74,4$ до $-68,1$ °С (табл. 4). Более низкие значения температуры стеклования пленок с глицерином, вероятно, обусловлены более высокой доступностью гидроксильных групп глицерина, которые ограничивали внутри- и межмолекулярные водородные связи между цепями, что приводило к более низкой энергии взаимодействия между цепями белок-полисахарид [51].

При увеличении массового соотношения альгината натрия и желатина от 0,5 до 1,0 г/г наблюдалось возрастание значений температуры плавления от $123,0$ до $138,5$ °С для систем, содержащих сорбитол (образцы № 1–3), и от $122,0$ до $134,8$ для систем с глицерином

(образцы № 4–6). Таким образом, тип используемого пластификатора практически не оказывало влияния на температуру плавления пленок – решающим фактором оказывалось содержание полисахарида в системе.

На термограмме, полученной при повторном нагреве (рис. 7б), не наблюдалось пиков плавления. При первом сканировании пленки имели частично кристаллическую структуру, тогда как при повторном сканировании после цикла охлаждения образцы представляли собой полностью аморфные материалы [54]. Для пленок с сорбитолом характерно наличие перехода стеклования в диапазоне температур от 15,8 до 35,7 °С, в то время как для варианта с глицерином переход стеклования наблюдалось в диапазоне от –63,5 до –54,5 °С. Несмотря на широкое изучение стеклований желатиновых пленок, результаты определения температуры стеклования оставались противоречивыми [53, 55]. Основной причиной значительных расхождений могут быть некоторые особенности молекул альгината натрия и желатина, например, молекулярная масса и совместимость биополимеров. Кроме того, температура стеклования тесно связана с условиями получения пленок, включая концентрацию полимера, pH, тип пластификатора и способ сушки [49].

Выводы

В данной работе получены пищевые биоразлагаемые пленки на основе рыбного желатина и альгината натрия. Варьировались следующие параметры: содержание желатина (4, 3 и 2 масс. %), количество и тип пластификатора (10 и 20 масс. %), а также массовое соотношение альгината натрия и желатина – 0,5; 0,7 и 1,0 г/г. Изучены органолептические и механические свойства пленок, а также кинетика паропроницаемости и влагопоглощения. Исследована структура и термическая устойчивость пленок. Рост массового соотношения альгината натрия и желатина повышал прочность и температуру плавления, сохраняя барьерные свойства, в то время как снижение концентрации желатина с 4 до 2 % и увеличение доли пластификатора с 10 до 20 % ухудшали механические свойства пленок. Установлены оптимальные соотношения компонентов в системе, обеспечивающие формирование пленочных материалов с улучшенными механическими и барьерными свойствами, включая пониженную гигроскопичность и паропроницаемость, а также повышенные температуры плавления (~135–138 °С). Наилучшие свойства продемонстрировала композиция, содержащая 4 % желатина, массовое соотношение альгината натрия и желатина – 1,0 г/г желатина и 10 % пластификатора. Сорбитол в качестве пластификатора приводил к формированию пленок с более однородной структурой, что выражалось в снижении показателей паропроницаемости и влагопоглощения, а также увеличению прочности. Однако он снижал пластичность пленок. Введение глицерина в состав пленочных материалов способствовало повышению их пластифицирующих

характеристик, однако, сопровождалось ростом показателей паропроницаемости и влагопоглощения. Таким образом, композиции, содержащие сорбитол в качестве пластифицирующего агента, могут применяться для создания жесткой тары или контейнеров для хранения готовых пищевых продуктов благодаря низкой пластичности. Композиции, содержащие глицерин, предпочтительнее применять для создания гибких упаковочных материалов в виде пленок для хранения продуктов с низким содержанием влаги, при этом механические свойства можно регулировать путем варьирования соотношения альгинат натрия / желатин.

Результаты данного исследования и выявленные закономерности будут служить основой для модификации свойств биополимерных композиций путем регулирования типа пластификатора, концентрации и соотношения компонентов в системе с целью создания пищевых пленок с низкой гигроскопичностью и высокими механическими характеристиками. Дальнейшие исследования будут сфокусированы на исследовании различных комбинаций пластификаторов для обеспечения баланса между механической прочностью и проницаемостью пленок. Также представляет интерес разработка методов повышения устойчивости пленок к воздействию влаги, что позволит расширить область их применения в пищевой промышленности.

Критерии авторства

Д. С. Колотова – концептуализация, курирование данных, методология, исследование, проверка, визуализация, написание – оригинальный черновик, написание – обзор и редактирование, привлечение финансирования. В. В. Бордиян – формальный анализ, исследование, написание – обзор и редактирование. Е. В. Боровинская – формальный анализ, исследование, написание – обзор и редактирование. С. О. Воропаева – формальный анализ, исследование, написание – обзор и редактирование.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности

Работа выполнена на базе научно-исследовательской лаборатории «Химия и технология морских биоресурсов» Мурманского арктического университета, созданной при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (FENR-2024-0001). Авторы также выражают благодарность А. С. Стопореву, кандидату химических наук, доценту Московского физико-технического института, за помощь в проведении экспериментов по дифференциальной сканирующей калориметрии.

Contribution

D.S. Kolotova developed the research concept, provided the data curation, designed the methodology, performed the research, validation, and visualization, drafted and

proofread the manuscript, and attracted research funds. V.V. Bordian was responsible for the formal analysis, research, drafting, and proofreading. E.V. Borovinskaya provided the formal analysis, research, drafting, and proofreading. S.O. Voropaeva performed the formal analysis, conducted the research, and drafted and proofread the manuscript.

Conflict of interest

The authors state that there is no conflict of interest.

Acknowledgements

The research was conducted on the premises of the Research Laboratory for Chemistry and Technology of Marine Bioresources, Arctic University, Murmansk, created with the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (FENR-2024-0001). The authors also express their gratitude to Associate Professor A.S. Stoporev, Candidate of Chemical Sciences, Moscow Institute of Physics and Technology, for assistance in differential scanning calorimetry.

Список литературы / References

1. Stoica M, Bichescu CI, Crețu CM, Dragomir M, Ivan AS, et al. Review of bio-based biodegradable polymers: Smart solutions for sustainable food packaging. *Foods*. 2024;13(19):3027. <https://doi.org/10.3390/foods13193027>
2. Birania S, Kumar S, Kumar N, Attkan AK, Panghal A, et al. Advances in development of biodegradable food packaging material from agricultural and agro-industry waste. *Journal of Food Process Engineering*. 2022;45(1):e13930. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13930>
3. Yin Y, Woo MW. Transitioning of petroleum-based plastic food packaging to sustainable bio-based alternatives. *Sustainable Food Technology*. 2024;2(3):548–566. <https://doi.org/10.1039/D4FB00028E>
4. Khandeparkar AS, Paul R, Sridhar A, Lakshmaiah VV, Nagella P. Eco-friendly innovations in food packaging: A sustainable revolution. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*. 2024;39:101579. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2024.101579>
5. Roy S, Malik B, Chawla R, Bora S, Ghosh T, et al. Biocompatible film based on protein/polysaccharides combination for food packaging applications: A comprehensive review. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2024;(Part 1):134658. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.134658>
6. Alam MW, Saravanan P, Al-Sowayan NS, Almutairi HH, Rosaiah P, et al. Polysaccharides and proteins based edible coatings for food protection: Classification, properties, & public demands (2020–2024). *Journal of Food Measurement and Characterization*. 2025;19:1533–1556. <https://doi.org/10.1007/s11694-024-03090-9>
7. Rahman S, Gogoi J, Dubey S, Chowdhury D. Animal derived biopolymers for food packaging applications: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2024;255:128197. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.128197>
8. Jin J, Luo B, Xuan S, Shen P, Jin P, et al. Degradable chitosan-based bioplastic packaging: Design, preparation and applications. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2024;(Part 1):131253. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.131253>
9. Gülpınar M, Tomul F, Arslan Y, Tran HN. Chitosan-based film incorporated with silver-loaded organo-bentonite or organo-bentonite: Synthesis and characterization for potential food packaging material. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2024;274(Part 2):133197. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.133197>
10. Кадималиев Д. А., Парчайкина О. В., Сюсин И. В., Чаиркин И. В., Малафеев А. Н. и др. Влияние трансглютаминазы на свойства пленок на основе хитозана и желатина. *Прикладная биохимия и микробиология*. 2021. Т. 57. № 3. С. 262–269. [Kadimaliev DA, Parchaykina OV, Syusin IV, Malafeev AN, Devyatkin AA, et al. Effect of transglutaminase on the properties of films prepared from chitosan and gelatin. *Applied Biochemistry and Microbiology*. 2021;57(3):262–269. (In Russ.)] <https://doi.org/10.31857/S0555109921030041>
11. Матвеева В. Г., Тихонов Б. Б., Лисичкин Д. Р., Сульман М. Г. Получение стабильных биоразлагаемых пленок на основе хитозана для использования в качестве пищевой упаковки. *Вестник Тверского государственного университета. Серия «Химия»*. 2024. № 2. С. 99–105. [Matveeva VG, Tikhonov BB, Lisichkin DR, Sulman MG. Obtaining stable biodegradable chitosan-based films for use as food packaging. *Herald of Tver State University. Series: Chemistry*. 2024;(2):99–105. (In Russ.)] <https://doi.org/10.26456/vtchem2024.2.12>
12. Мукатова М. Д., Сколков С. А., Моисеенко М. С., Киричко Н. А. Пищевая биоразлагаемая пленка с использованием хитозана. *Вестник астраханского государственного технического университета. Серия: рыбное хозяйство*. 2018. № 3. 124–131. [Mukatova MD, Skolkov SA, Moiseenko MS, Kirichko NA. Food biodegradable film containing chitosan. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Fishing Industry*. 2018;(3):124–131. (In Russ.)] <https://doi.org/10.24143/2073-5529-2018-3-124-131>
13. El-Sakhawy M, Tohamy HS, AbdelMohsen MM, El-Missiry M. Biodegradable carboxymethyl cellulose based material for sustainable/active food packaging application. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*. 2023;37(6):2035–2050. <https://doi.org/10.1177/08927057231211236>
14. Юнусов Х. Э., Сарымсаков А. А., Рашидова С. Ш. Структура и свойства биоразлагаемых пленок карбоксиметилцеллюлозы, содержащих наночастицы серебра. *Высокомолекулярные соединения. Серия А*. 2014. Т. 56. № 3. С. 276–281. [Yunusov KE, Sarymsakov AA, Rashidova SS. Structure and properties of biodegradable carboxymethyl cellulose films containing silver nanoparticles. *Polymer Science. Series A*. 2014;56(3):276–281. (In Russ.)] <https://doi.org/10.7868/S2308112014030183>

15. Демидова А. В., Макарова Н. В., Быков Д. Е., Еремеева Н. Б., Быкова Т. О. Исследование съедобной упаковки на основе яблочного пюре с добавкой пластификатора карбоксиметилцеллюлозы. Пищевая промышленность. 2016. № 12. С. 8–11. [Demidova AV, Makarova NV, Bykov DE, Eremeeva NB, Bykova TO. Research of edible packaging on the basis of apple puree with addition of the plasticizer carboxymethylcellulose. Food Industry. 2016;(12):8–11. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/XBSOTT>
16. Bajer D. Eco-friendly, biodegradable starch-based packaging materials with antioxidant features. *Polymers*. 2024; 16(7):958. <https://doi.org/10.3390/polym16070958>
17. Подкидышева М., Петрова А. С. Получение и исследование биоразлагаемой белково-полисахаридной пленки на основе картофельного крахмала. Международный научно-исследовательский журнал. 2023. № 7. [Podkidisheva M, Petrova AS. Production and research of biodegradable protein-polysaccharide film based on potato starch. *International Research Journal*. 2023;7(133). (In Russ.)] <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.133.82>
18. Mercadal PA, Picchio ML, González A. Food-protecting films based on soy protein isolate and natural deep eutectic solvents: Antimicrobial and antioxidant properties. *Food Hydrocolloids*. 2024;147(Part A):109414. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.109414>
19. Pires AF, Díaz O, Cobos A, Pereira CD. A review of recent developments in edible films and coatings-focus on whey-based materials. *Foods*. 2024;13(16):2638. <https://doi.org/10.3390/foods13162638>
20. Sun F, Zhao J, Shan P, Wang K, Li H, *et al.* Gelatin-based composite film integrated with nanocellulose and extract-metal complex derived from coffee leaf for sustainable and active food packaging. *Food Hydrocolloids*. 2025;159:110610. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2024.110610>
21. Bhatia S, Al-Harrasi A, Ullah S, Shah YA, Al-Azri MS, *et al.* Fabrication, characterization and antioxidant activities of pectin and gelatin based edible film loaded with *Citrus reticulata* L. essential oil. *Journal of Food Process Engineering*. 2024;47(4):e14583. <https://doi.org/10.1111/jfpe.14583>
22. Shankar S, Jaiswal L, Rhim JW. Gelatin-based nanocomposite films: Potential use in antimicrobial active packaging. In: Barros-Velázquez J, editor. *Antimicrobial Food Packaging*. NY: Academic Press; 2025, pp. 461–472. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90747-7.00030-2>
23. Аджиева Н. К., Ермагамбетова А. Д., Тажибаяева С. М., Тюсюпова Б. Б., Мусабеков К. Б. Получение и исследование структурно-механических свойств биоразлагаемых пленок на основе желатина. Вестник Алматинского технологического университета. 2024. Т. 143. № 1. С. 133–143. [Ajyieva NK, Yermagambetova AD, Tazhibayeva SM, Tyussyupova BB, Musabekov KB. Preparation and investigation of the structural and mechanical properties of biodegradable gelatin-based films. *The Journal of Almaty Technological University*. 2024;143(1):133–143. (In Russ.)] <https://doi.org/10.48184/2304-568X-2024-1-133-143>
24. Якубова О. С., Вострикова Л. Н., Кушбанова А. А. Формирование свойств биodeградируемых пленок на основе рыбного желатина. Вестник астраханского государственного технического университета. Серия: рыбное хозяйство. 2024. Т. 2024. № 2. С. 118–127. [Yakubova OS, Vostrikova LN, Kushbanova AA. Formation of biodegradable films properties based on gelatin. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Fishing Industry*. 2024;(2):118–127. (In Russ.)] <https://doi.org/10.24143/2073-5529-2024-2-118-127>
25. Oliver-Cadena M, León-Martínez FM, Rennecker S, Gutiérrez MC. Dual system to develop fish gelatin films with improved water resistance properties: Enzymatic cross-linking and multilayer lamination. *Journal of Food Measurement and Characterization*. 2024;18:7052–7066. <https://doi.org/10.1007/s11694-024-02716-2>
26. Smaoui S, Chaari M, Agriopoulou S, Varzakas T. Green active films/coatings based on seafood by-products (chitosan and gelatin): A powerful tool in food packaging. *Biomass Conversion and Biorefinery*. 2025;15:8331–8350. <https://doi.org/10.1007/s13399-024-05669-0>
27. Bakry NF, Isa MINM, Sarbon NM. Effect of sorbitol at different concentrations on the functional properties of gelatin/carboxymethyl cellulose (CMC)/chitosan composite films. *International Food Research Journal*. 2017;24(4):1753–1762.
28. Gómez-Guillén MC, Pérez-Mateos M, Gómez-Estaca J, López-Caballero E, Giménez B, *et al.* Fish gelatin: A renewable material for developing active biodegradable films. *Trends in Food Science & Technology*. 2009;20(1):3–16. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2008.10.002>
29. Ghasemlou M, Khodaiyan F, Oromiehie A. Physical, mechanical, barrier, and thermal properties of polyol-plasticized biodegradable edible film made from kefiran. *Carbohydrate Polymers*. 2011;84(1):477–483. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.12.010>
30. Wang X, Zhang H, Zhang X, Shen C, Liu M, *et al.* A comparison study on effects of polyglycerols on physical properties of alginate films. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2024;254(Part 3):127879. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.127879>
31. Sofi AZM, Ispindi NI, Babarinsa OI, Zaudin NAC, Yusuf NNAN, *et al.* Analysis of the biodegradable plastic formulation of *Zea mays* L (corn) and *Solanum tuberosum* (potato) with glycerol and sorbitol as plasticizers. *AIP Conference Proceedings*. 2025;3271(1):030009. <https://doi.org/10.1063/5.0259257>
32. Rosmawati R, Sari SF, Asnani A, Embe W, Asjun A, *et al.* Influence of sorbitol and glycerol on physical and tensile properties of biodegradable–edible film from snakehead gelatin and κ -Carrageenan. *International Journal of Food Science*. 2025;2025(1):7568352. <https://doi.org/10.1155/ijfo/7568352>

33. Xu X, Wang B, Gao W, Sui J, Wang J, et al. Effect of different proportions of glycerol and D-mannitol as plasticizer on the properties of extruded corn starch. *Frontiers in Nutrition*. 2024;10:1335812. <https://doi.org/10.3389/fnut.2023.1335812>
34. Khanonkon N, Dang KM, Yoksan R. Injection-molded thermoplastic cassava starch modified with single and mixed polyol plasticizers. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2024;280(Part 2):136335. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.136335>
35. Sirbu EE, Dinita A, Tănase M, Portoacă AI, Bondarev A, et al. Influence of plasticizers concentration on thermal, mechanical, and physicochemical properties on starch films. *Processes*. 2024;12(9):2021. <https://doi.org/10.3390/pr12092021>
36. Shah YA, Bhatia S, Al-Harrasi A, Tarahi M, Almasi H, et al. Insights into recent innovations in barrier resistance of edible films for food packaging applications. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2024;271(Part 1):132354. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.132354>
37. Kumar L, Ramakanth D, Akhila K, Gaikwad KK. Edible films and coatings for food packaging applications: A review. *Environmental Chemistry Letters*. 2022;20:875–900. <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01339-z>
38. Saklani P, Siddhnath DS, Singh SM. A review of edible packaging for foods. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*. 2019;8(7):2885–2895. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2019.807.359>
39. Cazón P, Velazquez G, Ramírez JA, Vázquez M. Polysaccharide-based films and coatings for food packaging: A review. *Food Hydrocolloids*. 2017;68:136–148. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.09.009>
40. Mohamed SAA, El-Sakhawy M, El-Sakhawy MA. Polysaccharides, protein and lipid-based natural edible films in food packaging: A review. *Carbohydrate Polymers*. 2020;238:116178. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116178>
41. Dou L, Li B, Zhang K, Chu X, Hou H. Physical properties and antioxidant activity of gelatin-sodium alginate edible films with tea polyphenols. *International journal of biological macromolecules*. 2018;118(Part B):1377–1383. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.06.121>
42. Chaari M, Elhadeif K, Akermi S, Akacha BB, Fourati M, et al. Novel active food packaging films based on gelatin-sodium alginate containing beetroot peel extract. *Antioxidants*. 2022;11(11):2095. <https://doi.org/10.3390/antiox11112095>
43. Shan P, Wang K, Yu F, Yi L, Sun L, et al. Gelatin/sodium alginate multilayer composite film crosslinked with green tea extract for active food packaging application. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2023;662:131013. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2023.131013>
44. Yan P, Lan W, Xie J. Modification on sodium alginate for food preservation: A review. *Trends in Food Science & Technology*. 2024;143:104217. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.104217>
45. Suderman N, Isa MIN, Sarbon NM. The effect of plasticizers on the functional properties of biodegradable gelatin-based film: A review. *Food Bioscience*. 2018;24:111–119. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2018.06.006>
46. Azmi NS, Basha RK, Othman SH, Mohammed MAP, Wakisaka M, et al. Development of fish gelatin film for anti-fogging mushroom packaging. *Journal of Food Engineering*. 2025;387:112306. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2024.112306>
47. Al-Hassan AA. Development and characterization of camel gelatin films: Influence of camel bone age and glycerol or sorbitol on film properties. *Heliyon*. 2024;10(9):e30338. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e30338>
48. Cao N, Yang X, Fu Y. Effects of various plasticizers on mechanical and water vapor barrier properties of gelatin films. *Food hydrocolloids*. 2009;23(3):729–735. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2008.07.017>
49. Rivero S, García MA, Pinotti A. Correlations between structural, barrier, thermal and mechanical properties of plasticized gelatin films. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2010;11(2):369–375. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2009.07.005>
50. Siracusa V, Rocculi P, Romani S, Rosa MD. Biodegradable polymers for food packaging: A review. *Trends in Food Science & Technology*. 2008;19(12):634–643. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2008.07.003>
51. Al-Hassan AA, Norziah MH. Starch–gelatin edible films: Water vapor permeability and mechanical properties as affected by plasticizers. *Food Hydrocolloids*. 2012;26(1):108–117. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2011.04.015>
52. Sartori C, Finch DS, Ralph B, Gilding K. Determination of the cation content of alginate thin films by FTi.r. spectroscopy. *Polymer*. 1997;38(1):43–51. [https://doi.org/10.1016/S0032-3861\(96\)00458-2](https://doi.org/10.1016/S0032-3861(96)00458-2)
53. Ma X, Qiao C, Zhang J, Xu J. Effect of sorbitol content on microstructure and thermal properties of chitosan films. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2018;119:1294–1297. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.08.060>
54. Yakimets I, Wellner N, Smith AC, Wilson RH, Farhat I, et al. Mechanical properties with respect to water content of gelatin films in glassy state. *Polymer*. 2005;46(26):12577–12585. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2005.10.090>
55. Kowalonek J, Łukomska B, Szydłowska-Czerniak A. Color, structure, and thermal stability of alginate films with raspberry and/or black currant seed oils. *Molecules*. 2025;30(2):245. <https://doi.org/10.3390/molecules30020245>