

Пищевые ингредиенты, сырье и материалы

Food ingredients, raw materials and materials

Научная статья

УДК 664.951

DOI: 10.14529/food250403

УЛУЧШЕНИЕ КАЧЕСТВА ГЕЛЯ ДЛЯ СУРИМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БЕЛКОВОГО СШИВАТЕЛЯ И ГИДРОКОЛЛОИДОВ

М.С. Будилов, 9506324@gmail.com

И.М. Титова, inna.titova@klgtu.ru

Калининградский государственный технический университет, Калининград, Россия

Аннотация. Сурими является одним из видов сырья для водных продуктов питания. На сегодняшний день он завоевал широкую популярность благодаря своим уникальным характеристикам, включая высокий уровень белка, низкую калорийность, невысокое количество жира, низкий уровень холестерина, хорошую желируемость и уникальную текстуру. Желирующие свойства являются одним из решающих факторов качества сурими и влияют на текстурные характеристики продукта и потребительские впечатления. Из-за колебаний температуры качество геля сурими-продуктов разрушается под воздействием кристаллов льда: снижается твердость, теряется влага, происходит разрушение гелевой сети. В связи с этим использование различных добавок, которые позволяют улучшить качество геля, составляет на сегодняшний день важную научно-практическую задачу. Цель статьи заключается в проведении анализа возможностей улучшения качества геля для сурими с использованием белкового шивателя и гидроколлоидов. Полученные в ходе исследования результаты позволили установить, что текстура является важным параметром в определении качественных характеристик и приемлемости для потребителей продукции сурими. Применение различных добавок и использование белковых шивателей представляет собой многообещающую тенденцию в технологиях изготовления сурими. Однако для получения максимального эффекта следует контролировать дозу добавки. Помимо этого, авторами отмечено, что перспективные направления исследования могут охватывать изучение возможностей сочетания различных добавок с современными методами обработки сурими.

Ключевые слова: сурими, гель, желирование, фенольные экстракты, температура, окисление, заморозка, белок, агрегация, добавки

Для цитирования: Будилов М.С., Титова И.М. Улучшение качества геля для сурими с использованием белкового шивателя и гидроколлоидов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Пищевые и биотехнологии». 2025. Т. 13, № 4. С. 23–30. DOI: 10.14529/food250403

Original article

DOI: 10.14529/food250403

IMPROVEMENT OF SURIMI GEL QUALITY USING PROTEIN CROSSLINKER AND HYDROCOLLOIDS

M.S. Budilov, 9506324@gmail.com

I.M. Titova, inna.titova@klgtu.ru

Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia

Abstract. Surimi is one of the raw materials for aquatic food products. To date, it has gained wide popularity due to its unique characteristics including high protein, low calorie, low fat, low cholesterol, good gelling properties and unique texture. Gelling properties are one of the decisive

factors in the quality of surimi products and affect the textural characteristics of the product and consumer experience. Due to temperature fluctuations, the gel quality of surimi products is degraded by ice crystals: hardness decreases, moisture is lost, and the gel network is destroyed. In this regard, the use of various additives that can improve the quality of the gel is currently an important scientific and practical task. The aim of the article is to analyze the possibilities of improving the quality of surimi gel using protein crosslinker, hydrocolloids. The results obtained during the study allowed us to establish that texture is an important parameter in determining the quality characteristics and consumer acceptability of surimi products. The addition of various additives and the use of protein crosslinkers represents a promising trend in surimi manufacturing technologies. However, the additive dosage should be controlled to maximize the effect. In addition, the author noted that promising research directions may encompass the study of combining various additives with modern surimi processing techniques.

Keywords: surimi, gel, gelling, phenolic extracts, temperature, oxidation, freezing, protein, aggregation, additives

For citation: Budilov M.S., Titova I.M. Improvement of surimi gel quality using protein crosslinker and hydrocolloids. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Food and Biotechnology*, 2025, vol. 13, no. 4, pp. 23–30. (In Russ.) DOI: 10.14529/food250403

Введение

Сурими, как важная часть обработанных водных продуктов питания, пользуются большой популярностью у потребителей из-за высокого уровня белка, низкого содержания жира, высокой питательности, а также удобства потребления. В настоящее время эти продукты стали незаменимыми в повседневной жизни людей [1].

Функциональные свойства сурими включают желирующую, связывающую и эмульгирующую способность, что делает его потенциальным функциональным белковым ингредиентом в ряде продуктов, таких как аналог креветок, омаров и крабов, рыбные шарики и т. д. Гелеобразующая способность сурими в основном обеспечивается миофибрillлярными белками. Хотя для повышения прочности геля сурими используются различные пищевые ингредиенты, их добавление приводит к нежелательным последствиям для геля, таким как появление стороннего привкуса и цвета [2]. Обычно сурими промывают несколько раз во время обработки, чтобы улучшить его гелеобразные свойства и стабильность при хранении. Однако этот процесс удаляет большинство липидных компонентов и вкусовых соединений, что приводит к большой потере вкуса и аромата в конечном продукте.

В процесс гелеобразования вовлечены многие ферменты, которые оказывают положительное или отрицательное влияние на структуру геля. Например, эндогенная транс-

глутамина, присутствующая в сурими, может катализировать реакцию ацильного переноса между ε-аминогруппами остатков лизина и γ-карбоксиамидными группами остатков глутамина на тяжелых цепях миозина, что приводит к образованию ε-(γ-глутамил)-лизиновых связей между белками, ответственных за явление «схватывания» и высокую эластичность геля конечных продуктов [3]. Кроме того, учеными отмечено, что хотя эндогенная трансглутамина усиливает гелеобразование и укрепляет сеть геля, образуя несульфидные ковалентные связи между миозинами, сохраняются проблемы с получением удовлетворительных свойств геля, возможно, из-за Ca^{2+} -зависимых характеристик активации и потери активности в процессе производства сурими [4].

Сегодня количество коммерческих гелевых продуктов растет благодаря использованию различных добавок, таких как моносахариды, олигосахариды, полисахариды и гидролизаты на основе белков. Добавление этих ингредиентов улучшает желирующие свойства геля сурими различными способами: а) предотвращая окисление, денатурацию и агрегацию белков; б) улучшая межмолекуллярное взаимодействие; в) усиливая сшивку аминокислот и г) уменьшая количество свободных молекул воды в процессе обработки и хранения [5].

В настоящее время исследователи уделяют особое внимание добавлению новых эф-

фективных добавок с использованием современных технологий для улучшения функциональных и желирующих свойств сурими-геля в процессе переработки и консервирования по сравнению с традиционными методами. Поэтому данное направление исследования представляет научно-практический интерес, что и обусловило выбор темы данной статьи.

Исследования свойств геля и вкусовых характеристик продуктов сурими при добавлении наноэмulsionей изучают такие авторы как: Лутова А.П., Мустафаева В.М., Лихутов Д.А., Иванова Д.А., Битютская О.Е., Мазалова Н.Ф. Yi Shi, Lanlan Tu, Chengzhi Yuan, Jinhong Wu, Xianghong Li, Shaoyun Wang.

Причины автолитической деградации миофibrillлярных белков при добавлении различных эндогенных протеаз, таких как катепсины В и L, термостабильные щелочные протеиназы, а также сериновые и цистеиновые протеиназы, что в результате препятствует образованию удовлетворительных гелевых структур, описывают в своих публикациях Прокскура Д.Ю., Шамрай-Ламешко Е.В., Киселева Е.Д., Ракоид А.Р., Ткачев В.В., Салтанова Н.С., Huiyun Chen, Xu Chen, Yanshun Xu, Yunyi Yang, Cikun Liu, Yingying Sun, Xinyi Wen.

Вопросами влияния полисахаридов на характеристики геля и его белковую микроструктуру, занимаются Рудич В.Д., Вершинин-

на А.Г., Харенко Е.Н., Яричевская Н.Н., Avtar Singh, Saumya Mehta, Umesh Patil, Pornrot Nuthong.

В то же время, несмотря на имеющиеся труды и наработки, вопросы устранения проблемы, связанной с деградацией белка, вызванной эндогенными протеазами, остаются открытыми. Отдельного внимания заслуживает развитие стратегий эмульгирования, которые позволяют загружать большое количество липидов без ущерба для гелевой текстуры продуктов сурими.

Таким образом, цель статьи заключается в проведении анализа возможностей улучшения качества геля для сурими с использованием белкового сшивателя и гидроколлоидов.

Результаты и их обсуждение

В настоящее время для получения сурими с низким содержанием соли и усиленными свойствами геля вводят экзогенные добавки, такие как крахмал, некрахмальные полисахариды, гидроколлоиды, растительные масла или животные масла [6]. Однако необходимо учитывать стоимость и источники этих добавок, чтобы не ухудшить качество конечного продукта и не удорожать процесс производства.

В целом, подход к получению желаемых свойств геля сурими достигается путем модификации белков с помощью сшивки (рис. 1).

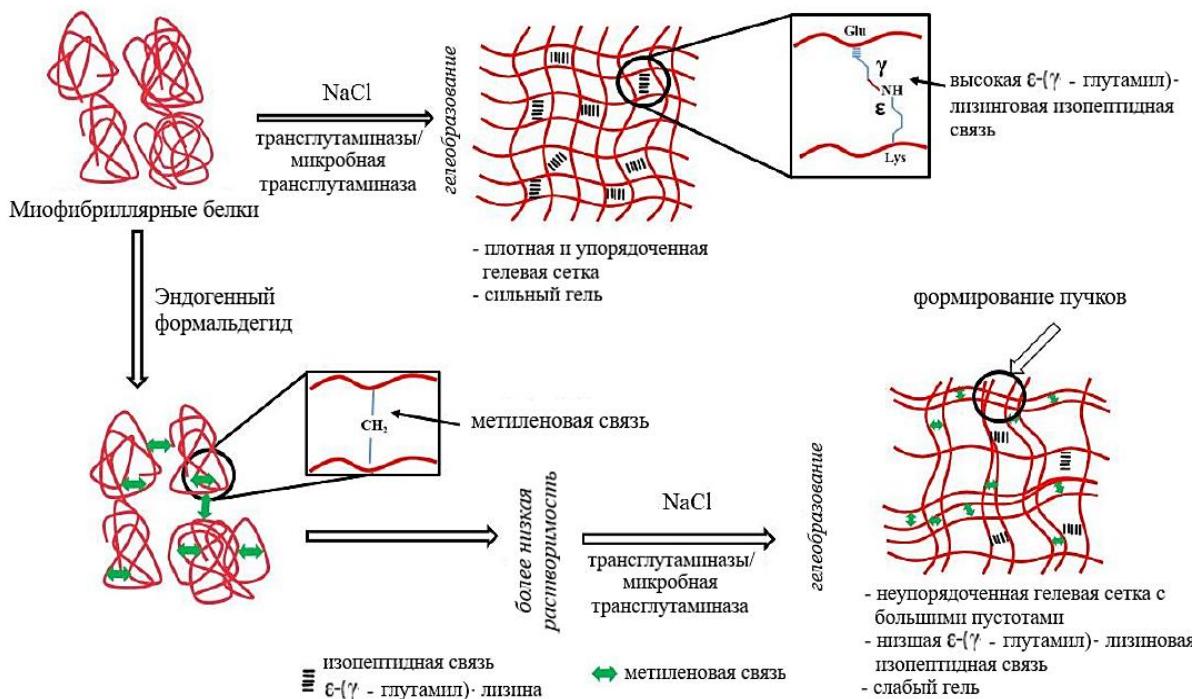


Рис. 1. Роль растительных полифенолов в желировании сурими

Недавно было продемонстрировано, что некоторые побочные продукты (семена, кожура, шелуха и другие растительные отходы) эффективно улучшают свойства геля-сурими, благодаря содержанию в них фенольных соединений. Фенольные соединения могут взаимодействовать с белком посредством не-

ковалентной связи и вызывать процесс спшивания белка [7]. Обзор спшивателей и различных источников, используемых в пищевых белках, представлен в таблице.

В качестве примера влияния фенольных добавок на гелеобразование и текстурные характеристики геля из сурими рассмотрим ре-

**Таблица
Фенольные экстракты из различных природных источников и их использование в сурими [8–10]**

Источники	Активные соединения	Применение
Кокосовая шелуха (СНЕ)	Дубильная кислота, катехин, галловая кислота, кверцетин	Использование СНЕ в концентрации 0,125 г/100 г белка увеличило прочность геля сурими из сардины на 240 %
Фрукты дуэя чинг (DC)	Нарингенин-7-О-глюкозид, кверцетин-3-галактозид, рутин, индол-4-карбальдегид	Разрывная сила геля сурими сардины была увеличена на 100 % при добавлении DC в количестве 0,05 г/100 г
Древесина киама (KW)	Дубильная кислота, лигнин	Окисленный KW в количестве 0,15 г/100 г увеличил разрывную силу геля сурими сардины до 136,9–157,5 % по сравнению с контролем
Корневой узел лотоса (LRK)	Процианидин В-типа димер-H ₂ O, (-)-эпикатехин, хлорогеновая кислота, пропилгаллат, рутин	Прочность геля, модуль упругости и дисульфидная связь гелей сурими серебряного карася значительно увеличились при добавлении LRK, особенно при 10 г/100 г, где прочность геля и дисульфидная связь увеличились на 14,7 % и 41,6 %, соответственно
Оливковый лист (OL)	Олеуропеин, гидрокситирозол, вербакозид	Добавление OL (0,3 г/100 г) привело к увеличению напряжения разрыва геля сурими из красного морского леща на 80 %
Лист периллы (PL)	Кофеиновая кислота, феруловая кислота, розмариновая кислота, кверцетин и апигенин	Гели с PL имели более тонкие и плотные белковые сети
Кожура ананаса (PP)	Галловая кислота, эпикатехин, катехин, феруловая кислота	PP (1 г/100 г) продемонстрировал повышение разрывной силы геля сурими серебряного карпа с 355,71 г до 511,64 г. PP также способствовал образованию амидных связей с белком гелей
Гранатовая кожура (PoP)	Пуникалагин, эллаговая кислота, галловая кислота, эллагитаннины	Гель сурими серебряного карася, обогащенный 0,45 г/100 г PoP, продемонстрировал более высокую прочность геля, чем гель без PoP на 101 % (609,58 г см)
Морские водоросли (SW)	Хлортанины, розмариновая кислота, хиновая кислота, рутин, кверцитин, гесперидин	Гель сурими из малой сардины с добавлением 2 г/100 г SW увеличил прочность геля на 76,27 % по сравнению с контрольным гелем
Полифенолы чая (TP)	(-)-эпикатехин (EC), (-)-эпикатехин галлат (ECG), (-)-эпигаллокатехин (EGC) и (-)-эпигаллокатехин галлат (EGCG)	TP в концентрации 300 мг/кг сохраняет водоудерживающую способность и твердость сурими из тилапии при хранении в холодильнике в течение 7 дней

зультаты, полученные коллективом ученых из Китая, которые рассматривали влияние этанольных экстрактов кожуры граната (PPE) на сурими из белого толстолобика [11].

Сурими готовили по методу, описанному в Sharma et al. (2019). Полученный продукт 500 г упаковали в полиэтиленовые пакеты низкой плотности. После сурими смешивали с сублимированными PPE, полученными с использованием 100 % этанола с концентрацией 0,15; 0,30; 0,45; 0,60; 0,75 и 0,90 %. Обогащенный сурими смешивали с 2,5 % NaCl и оставляли в течение часа при 10 °C перед набивкой. Пасту набивали в оболочку из винилиденхлорида (длина 10 см, диаметр 2,0 см) с последующей термической обработкой в соответствии с двухэтапным методом нагрева. После приготовления гелевые оболочки помещали в ледяную воду, охлаждали до 4–5 °C в течение 30 мин и хранили в течение ночи при 4 °C до анализа.

Трехмерная структура белкового геля состоит из различных нековалентных взаимодействий, в основном ионных связей, водо-

родных связей и гидрофобных взаимодействий. Хотя все нековалентные взаимодействия, такие как ионные связи, водородные связи и гидрофобные взаимодействия, значительно различались ($p < 0,05$) при различных концентрациях PPE, однако большее количество водородных связей ($2,04 \pm 0,03$ мг/мл) и гидрофобных взаимодействий ($1,70 \pm 0,03$ мг/мл) было обнаружено в геле сурими, обогащенном 0,45 % PPE (рис. 2).

В случае ионных взаимодействий количество уменьшилось от контроля до 0,60 % уровня PPE, а затем увеличилось и достигло уровня контроля ($0,88 \pm 0,02$ мг/мл). В данном исследовании pH в контроле составил $7,13 \pm 0,02$, который постепенно снижался с увеличением концентрации PPE (рис. 3).

Разница в значениях pH может изменять распределение заряда аминокислот на поверхности белков сурими. Полученные учеными результаты показали, что ионные связи уменьшались с уменьшением pH, первоначально с увеличением прочности геля, в то время как с увеличением концентрации PPE

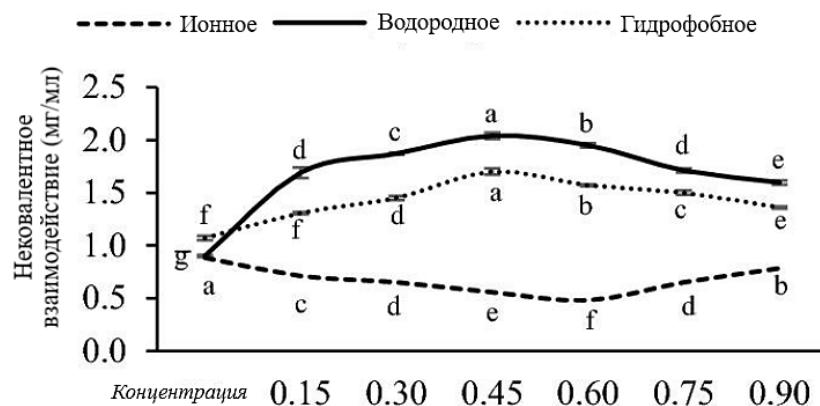


Рис. 2. Нековалентные химические взаимодействия

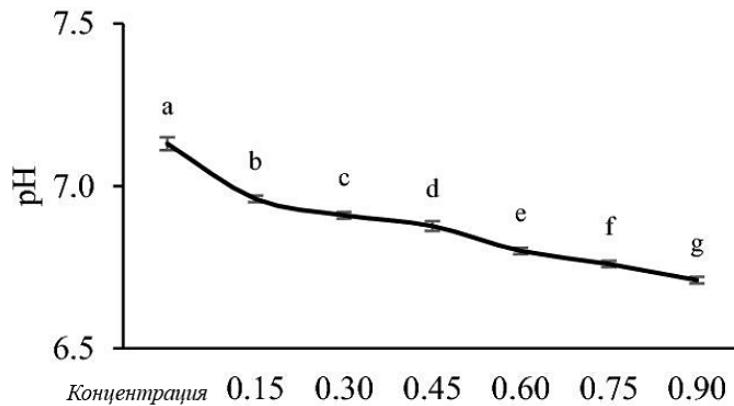


Рис. 3. Влияние этанольных экстрактов кожуры граната на гели сурими серебряного карпа, pH

прочность геля снижалась даже при увеличении ионных связей. Из этого был сделан вывод, что при более низких значениях pH изоэлектрический pH (pI) миофибриллярного белка смещается в сторону кислотности, что приводит к образованию большего количества ионных связей между PPE и аминокислотами, которые препятствуют белковому взаимодействию между фенольными веществами и сурими, что приводит к снижению прочности геля.

Помимо улучшения текстуры геля сурими, растительные фенолы также снижают уровень окисления белков и липидов, присутствующих в сурими или сурими-продуктах, тем самым увеличивая срок их хранения [12].

Также заслуживают внимания результаты исследования, в рамках которого изучалось влияние гидроколлоидов на качественные характеристики геля сурими. Ученые определили влияние сульфатированного полисахарида в качестве криопротектора на гель на основе белка тремя способами. Во-первых, установлено, что сульфатированный полисахарид обладает сильными буферными свойствами, которые способствуют деполимеризации толстых нитей [13]. Во-вторых, он связывается с молекулами миозина, усиливая диссоциацию актомиозина за счет контраста с аденоzin трифосфатом и связывания с головкой миози-

на. В-третьих, молекулы полисахарида, связанные с хвостом миозина, усиливают диссоциацию миозиновых филаментов [14]. Помимо этого, исследователи пришли к выводу, во всем этом механизме гидроколлоиды также работают как эффективные антиоксиданты, которые предотвращают денатурацию и агрегацию белков при консервировании и переработке [15].

Иллюстрация желирующих свойств сурими с добавлением и без добавления гидроколлоидов представлена на рис. 4.

В процессе исследования было доказано, что смеси сахарозы с полифосфатами уменьшают окисление белков сурими и улучшают желирующие способности за счет образования соответствующих сшивок между аминокислотами. Кроме того, добавление сульфатированного полисахарида с другими сахарами улучшало водо связывающие и текстурные свойства геля сурими. Смесь сорбита и гексаметаfosфата также улучшила текстуру и водоудерживающие свойства сурими.

Следует отметить, что преимущества добавления гидроколлоидов в гель-сурими могут быть получены при условии использования их оптимального количества. Поскольку избыточное количество полисахаридов может подвергнуться самоагрегации и нарушить формирование упорядоченной сетевой структуры, что

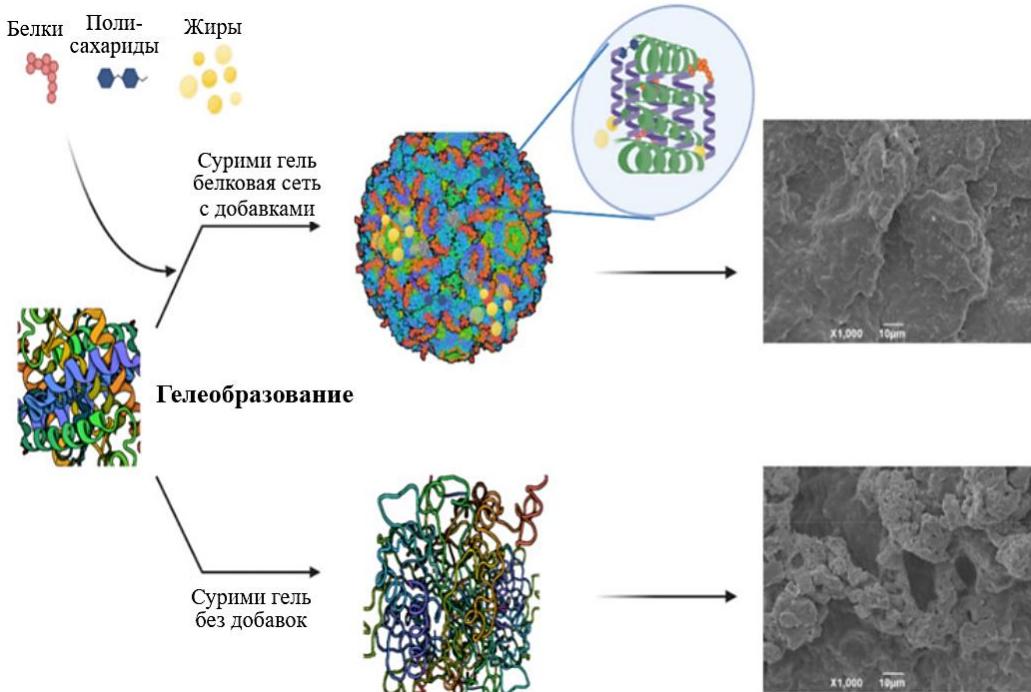


Рис. 4. Свойства гелеобразования сурими с добавлением и без добавления добавок

приведет к снижению прочности геля сурими. Кроме того, это может вызвать эффект разбавления миофibrillлярных белков в сурими. В случае небольшого количества воды гидроколлоиды на основе полисахаридов склонны к агрегации и наматыванию на себя, тем самым занимая большую пустоту и приводя к деформации сети белкового геля. Таким образом, необходимо учитывать тип гидроколлоидов и уровень их содержания, прежде чем использовать в качестве усилителя геля в сурими.

Выводы

Подводя итоги, следует отметить, полученные на сегодняшний день результаты исследований свидетельствуют о том, что свойства геля сурими могут быть улучшены благодаря добавлению белкового сшивателя,

особенно фенольных веществ из растений, а также гидроколлоидов при соответствующем количестве. Использование этих добавок может улучшить стабильность белка, предотвращая окислительные изменения в белках миозина, денатурацию и агрегацию.

Перспективные направления дальнейших исследований могут быть сосредоточены на изучении возможностей сочетания различных добавок с современными методами обработки (методы обработки под высоким давлением, ультрафиолетовая и микроволновая обработка). Предполагается, что такое сочетание позволит достичнуть улучшения текстурных свойств за счет улучшения сшивания аминокислот, межмолекулярных взаимодействий и водородных связей.

Список литературы

- Харенко Е.Н. Современные тенденции использования мятая для производства фарша сурими // Труды ВНИРО. 2022. Т. 189. С. 222–227.
- Чупикова Е.С. Некоторые аспекты технологии рыбного фарша «сурими» при глубокой переработке мятая // Рыбное хозяйство. 2023. № 3. С. 109–115.
- Kangyuan Long. Effect of modified washing process on water usage, composition and gelling properties of grass carp surimi // Journal of the Science of Food and Agriculture. 2022. Vol. 102. Iss. 15. P. 90–97.
- Avtar Singh. Hyperoside improves the textural and rheological properties of threadfin bream surimi gel // International Journal of Food Science & Technology. 2023. Vol. 58. Iss.9. P. 103–111.
- Ткачев В.В., Салтанова Н.С. Разработка технологии аналоговых продуктов на основе сурими // Природные ресурсы, их современное состояние, охрана, промысловое и техническое использование: материалы XIV Национальной (всероссийской) научно-практической конференции. Петропавловск-Камчатский, 2023. С. 178–181.
- Лихутов Д.А., Иванова Д.А. Подход к выбору крабовых палочек // Студенческая наука – первый шаг к цифровизации сельского хозяйства: материалы III Всероссийской студенческой научно-практической конференции: в 3 ч. Чебоксары, 2023. С. 300–303.
- Min Lin. Characteristics of hairtail surimi gels treated with myofibrillar protein-stabilized Pickering emulsions // Journal of the Science of Food and Agriculture. 2024. Vol. 104. Iss. 7. P. 87–93.
- Mingjing Zheng. Impacts of agar gum and fucoidan on gel properties of surimi products without phosphate // Food Science & Nutrition. 2022. Vol.10. Iss. 11. P. 10–16.
- Османова Ю.В. Технология производства специализированной быстрозамороженой продукции для геродиетического питания // Инновации в индустрии питания и сервисе: электронный сборник материалов IV Международной научно-практической конференции. 2020. С. 523–526.
- Ширитова Л.Ж. Технология производства быстрозамороженой продукции для людей пожилого возраста // Актуальные проблемы технологии продуктов питания, туризма и торговли: материалы V Всероссийской (национальной) научно-практической конференции. Нальчик, 2023. С. 46–49.
- Xueli He. Effect of oat β-glucan on gel properties and protein conformation of silver carp surimi // Journal of the Science of Food and Agriculture. 2023. Vol. 103. Is. 7. P. 23–29.
- Ranran Wang. Effect of heating temperature on electrical properties and gel properties of carp surimi // Journal of Food Process Engineering. 2023. Vol. 46. Iss. 8. P. 66–69.
- Dan Wu. Antioxidant abilities of barley green powder and its inhibitory effect on lipid oxidation of frozen surimi // International Journal of Food Science & Technology. 2023. Vol. 58. Iss. 11. P. 76–81.

14. Qian Zhong. Effects of anthocyanins and microbial transglutaminase on the physicochemical properties of silver carp surimi gel // *Journal of Texture Studies*. 2023. Vol. 54. Iss. 4. P. 30–34.

15. Корнейко О.В. Опыт развития рыбохозяйственной деятельности Китая // Теоретическая и прикладная экономика. 2017. № 4. С. 59–64.

References

1. Kharenko E.N. Modern trends in the use of pollock for the production of surimi mince. *Proceedings of VNIRO*, 2022, vol. 189, pp. 222–227. (In Russ.)
2. Chupikova E.S. Some aspects of the technology of surimi fish mince during deep processing of pollock. *Fisheries*, 2023, no. 3, pp. 109–115. (In Russ.)
3. Kangyuan Long. Effect of modified washing process on water usage, composition and gelling properties of grass carp surimi. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2022, vol. 102, iss. 15, pp. 90–97.
4. Avtar Singh. Hyperoside improves the textural and rheological properties of threadfin bream surimi gel. *International Journal of Food Science & Technology*, 2023, vol. 58, iss. 9, pp. 103–111.
5. Tkachev V.V., Saltanova N.S. Development of technology for analog products based on surimi. *Natural resources, their current state, protection, commercial and technical use. Proceedings of the XIV National (All-Russian) Scientific and Practical Conference*. Petropavlovsk-Kamchatsky, 2023, pp. 178–181. (In Russ.)
6. Likhutov D.A., Ivanova D.A. Approach to the selection of crab sticks. *Student science – the first step towards the digitalization of agriculture. Proceedings of the III All-Russian Student Scientific and Practical Conference*. Cheboksary, 2023, pp. 300–303. (In Russ.)
7. Min Lin. Characteristics of hairtail surimi gels treated with myofibrillar protein-stabilized Pickering emulsions. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2024, vol. 104, iss. 7, pp. 87–93.
8. Mingjing Zheng. Impacts of agar gum and fucoidan on gel properties of surimi products without phosphate. *Food Science & Nutrition*, 2022, vol. 10, iss. 11, pp. 10–16.
9. Osmanova Yu.V. Technology of production of specialized quick-frozen products for gerodietetic nutrition. *Innovations in the food industry and service. Electronic collection of materials of the IV International scientific and practical conference*, 2020, pp. 523–526. (In Russ.)
10. Shiritova L.Zh. Technology of production of quick-frozen products for the elderly. *Actual problems of food technology, tourism and trade. Materials of the V All-Russian (national) scientific and practical conference*. Nalchik, 2023, pp. 46–49. (In Russ.)
11. Xueli He. Effect of oat β-glucan on gel properties and protein conformation of silver carp surimi. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2023, vol. 103, iss. 7, pp. 23–29.
12. Ranran Wang. Effect of heating temperature on electrical properties and gel properties of carp surimi. *Journal of Food Process Engineering*, 2023, vol. 46, iss. 8, pp. 66–69.
13. Dan Wu. Antioxidant abilities of barley green powder and its inhibitory effect on lipid oxidation of frozen surimi. *International Journal of Food Science & Technology*, 2023, vol. 58, iss. 11, pp. 76–81.
14. Qian Zhong Effects of anthocyanins and microbial transglutaminase on the physicochemical properties of silver carp surimi gel. *Journal of Texture Studies*, 2023, vol. 54, iss. 4, pp. 30–34.
15. Korneiko O.V. Experience in the development of fisheries activities in China. *Theoretical and Applied Economics*, 2017, no. 4, pp. 59–64. (In Russ.)

Информация об авторах

Будилов Максим Сергеевич, аспирант, Калининградский государственный технический университет, Калининград, Россия; 9506324@gmail.com

Титова Инна Марковна, кандидат технических наук, заведующая кафедрой, Калининградский государственный технический университет, Калининград, Россия; inna.titova@klgtu.ru

Information about the authors

Maxim S. Budilov, postgraduate student, Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia; 9506324@gmail.com

Inna M. Titova, Candidate of Technical Sciences, Head of Department, Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia; inna.titova@klgtu.ru

Статья поступила в редакцию 20.09.2025

The article was submitted 20.09.2025