

УДК 637.5.037

Влияние изменения белков в процессе длительного воздействия низких температур на качество мяса: обзор предметного поля

¹ ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В.М. Горбатова» РАН

² ФГБОУ ВО Московский государственный университет пищевых производств

КОРРЕСПОНДЕНЦИЯ:

Лисицын Андрей Борисович
ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В.М. Горбатова» РАН
Адрес: 109316, Москва, ул. Талалихина, 26

ФГБОУ ВО Московский государственный университет пищевых производств
Адрес: 109029, Москва, ул. Талалихина, 33
E-mail: ablitsyn@yandex.ru

ЗАЯВЛЕНИЕ О ДОСТУПНОСТИ ДАННЫХ:
данные текущего исследования доступны по запросу у корреспондирующего автора.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Лисицын А. Б., Чернуха И. М., & Лунина О. И. (2022). Влияние изменения белков в процессе длительного воздействия низких температур на качество мяса: обзор предметного поля *Хранение и переработка сельхозсырья*, (2), 78-95. <https://doi.org/10.36107/spfp.2022.287>

ПОСТУПИЛА: 28.02.2022

ПРИНЯТА: 24.03.2022

ОПУБЛИКОВАНА: 30.06.2022

ФИНАНСИРОВАНИЕ:

ФНЦ пищевых систем им. В.М. Горбатова, Московский государственный университет пищевых производств

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

авторы сообщают об отсутствии

А. Б. Лисицын^{1,2}, И. М. Чернуха^{1,2}, О. И. Лунина¹

АННОТАЦИЯ

Введение. Замораживание и низкотемпературное хранение мяса приводят к изменению его качества. Мясо является белковым продуктом, поэтому модификация белков и частичная потеря их первоначальных свойств при технологической обработке обуславливает окончательное качество мяса.

Цель. Несмотря на многочисленные отечественные публикации в области замораживания мяса не найдено статей, в которых систематизируется информация, полученная разными авторами по влиянию замораживания и хранения мяса при низких температурах на его пищевую ценность и технологические свойства.

Материалы и методы. В обзоре представлены результаты исследований российских и зарубежных исследователей, опубликованные в научных журналах в период с 2009 по 2020 год. Поиск источников осуществлялся по ключевым словам. Литература группировалась по влиянию замораживания и низкотемпературного хранения на биологическую ценность мяса (аминокислотный состав, незаменимые аминокислоты, фракционный состав белков, переваримость), окисление белка, биодоступность белковой системы мяса, функционально-технологические свойства мяса (влагосвязывающая способность, величина pH, потери мясного сока), а также условий замораживания (последовательность созревания, скорость замораживания) на качество мяса.

Результаты. В обзоре рассматриваются изменения, происходящие в белковой системе в результате морозильного хранения, приводящие к снижению пищевых и технологических свойств мяса. Особое внимание уделено окислению белка, процесса, способствующего потере функциональности белка и негативно влияющего на здоровье потребителя.

Выводы. Результаты, представленные в статье, могут быть использованы при планировании исследований по изучению качества замороженного мяса, определении перспективных направлений в области замораживания пищевой продукции.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

замороженное мясо, белки, свойства, качество, пищевая ценность, продукты окисления белка



Influence of Protein Changes During Prolonged Exposure to Low Temperatures on Meat Quality: Scoping Review

¹ V. M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems

² Moscow State University of Food Production

CORRESPONDENCE:

Andrey B. Lisitsyn

V. M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems

26, Talalikhina str., Moscow, 109316, Russian Federation

Moscow State University of Food Production

33, Talalikhina str., Moscow, 109029, Russian Federation

E-mail: ablisitsyn@yandex.ru

FOR CITATIONS:

Lisitsyn A. B., Chernukha I. M., & Lunina O. I. (2022). Influence of protein changes during prolonged exposure to low temperatures on meat quality: Scoping review. *Storage and Processing of Farm Products*, (2), 78-95. <https://doi.org/10.36107/spfp.2022.287>

RECEIVED: 28.02.2022

ACCEPTED: 24.03.2022

PUBLISHED: 30.06.2022

DECLARATION OF COMPETING

INTEREST: none declared



Andrey B. Lisitsyn^{1,2}, Irina M. Chernukha^{1,2}, Olga I. Lunina¹

ABSTRACT

Background. Freezing and low-temperature storage of meat leads to changes in its quality. Meat is a protein product, so the modification of proteins and partial loss of their original properties determines the final quality of meat.

Purpose. Despite numerous domestic publications on meat freezing no articles in which the information received by different authors on influence of meat freezing and storage at low temperatures on its biological value and functional and technological properties is systematized are found.

Materials and methods. The review presents the results of studies by Russian and foreign researchers published in scientific journals in the period from 2009 to 2020. The sources were searched by keywords. The literature was grouped according to the influence of freezing and low-temperature storage on the biological value of meat (amino acid composition, essential amino acids, fractional composition of proteins, digestibility), protein oxidation, bioavailability of protein system of meat, functional and technological properties of meat (moisture binding capacity, pH value, drip losses), and freezing conditions (ripening sequence, freezing rate) on meat quality.

Results. The review examines the changes that occur in the protein system during freezing storage of meat, leading to a decrease in the nutritional and technological properties of meat. Particular attention is paid to protein oxidation, a process that contributes to the loss of protein functionality and negatively affects the health of the consumer.

Conclusion. The results presented in the article can be used when planning research on the study of the quality of frozen meat, determining promising directions in the field of freezing food products.

KEYWORDS

frozen meat, cold storage, proteins, quality, nutritional value, protein oxidation products

ВВЕДЕНИЕ

Потребление мяса должно обеспечивать организм человека необходимыми эссенциальными нутриентами и, в первую очередь, полноценным белком. Изменения температуры при технологической обработке мясного сырья, вызывают каскад химических и физических изменений, которые приводят к модификации белковой фракции (Chernukha & Akhremko, 2019). Причем белки подвержены изменениям, как при высоких температурах, так и при низкотемпературных воздействиях. В замороженном мясе продолжают протекать биохимические реакции вследствие того, что часть воды остается в незамерзшем состоянии.

При низкотемпературном хранении мяса происходит вымерзание влаги и ее кристаллизация. Рост кристаллов тесным образом связана с процессами, происходящими в мясе в период раннего автолиза и замораживания, обуславливающие в мясе перераспределение воды между структурными элементами, нарушение целостности мышечных волокон, их усадку (Хвыля и др., 2018), частичную агрегацию и денатурацию мышечных белков (Князева и др., 2017), уменьшение их растворимости (Leygonie et al., 2012a; Leygonie et al., 2012b), разрыхление соединительнотканых структур (Хвыля и др., 2018), окисление жиров и белков (Alonso et al., 2016). Происходящие процессы и модификация белковой составляющей мяса приводят, в том числе, к изменению величины pH, влагосвязывающей способности мяса, органолептических характеристик мяса, увеличению потери мясного сока после размораживания (Хвыля и др., 2018), т.е. снижению биологической ценности мясного сырья и его функционально-технологических свойств. Биологическая ценность и функционально-технологические свойства являются основными критериями пригодности мяса для его дальнейшей переработки в мясную продукцию и ценности для человека и находятся в постоянной сфере профессиональных интересов ученых.

Публикации российских авторов по данной тематике описывают, в основном, результаты собственных исследований, и не было найдено статей, объединяющих научные знания по влиянию замораживания и длительного низкотемпературного хранения на качество мясного сырья. При анализе публикаций отечественных авторов была выявle-

на единственная обзорная информация, которая представляла собой перевод и редактирование глав «Рекомендаций Международного института холода по производству и хранению замороженных пищевых продуктов» (известные как «Красная книга»), изданных в Париже в 2006 г. (Белозеров и др., 2015). Рекомендации обобщали результаты работ научно-исследовательских организаций, отдельных ученых из разных стран и отражали современный мировой опыт промышленного холодильного и морозильного консервирования пищевых продуктов и были актуальны для российских специалистов. Рекомендации относились к режимам замораживания, физическим, химическим и ферментным процессам во время замораживания и хранения, биохимическим и микробиологическим, теплофизическим аспектам замораживания мяса, мониторингу температуры в процессе хранения и методам ее измерения, методам размораживания, срокам хранения замороженных продуктов, использованию упаковки, пищевых добавок для улучшения качества размороженного сырья, сенсорной оценки и др. Научные аспекты исследований в области изменения питательных и функциональных свойств не были затронуты в этом обзоре.

В области замораживания пищевых продуктов зарубежные ученые проявляют интерес к новым технологиям быстрого замораживания (Cheng et al., 2017), влиянию замораживания и оттаивания на качество мяса, механизмам, используемым для смягчения последствий замораживания и оттаивания (Leygonie et al., 2012).

Цель обзора состояла в том, чтобы обобщить, систематизировать и проанализировать отечественные и зарубежные знания по влиянию замораживания мяса и холодильному хранению при низких отрицательных температурах на его биологическую ценность и функционально-технологические свойства.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Базы данных и временные рамки

В работе проведен обзор предметного поля по теме «Влияние изменения белков в процессе длительного воздействия низких температур на качество мяса», обобщены и систематизированы данные по результатам исследований за последние 20 лет

(с 2001 по 2020 гг) различных групп ученых как России, так и зарубежья. Дана оценка влиянию замораживания мяса и холодильному хранению при низких отрицательных температурах на его биологическую ценность и функционально-технологические свойства и даны ответы на поставленные вопросы:

1. Как влияет замораживание мяса и холодильное хранение при низких отрицательных температурах на его биологическую ценность;
2. Как влияет замораживание мяса и холодильное хранение при низких отрицательных температурах на его функционально-технологические свойства.

Результаты анализа были представлены в виде таблиц и диаграмм для визуализации данных. Поиск источников литературы осуществлялся в базах данных Scopus и eLibrary.ru.

Критерии включения источников

Отбор источников для анализа реализовывался по ключевым словам: замороженное мясо, белки, свойства, качество, пищевая ценность, продукты окисления белка. Анализировались источники за последние 20 лет, на русском и иностранных языках, опубликованных в научных журналах, материалах конференций различных уровней, а также монографии, посвященные тематике исследования.

Стратегия исследования

Была разработана и протестирована стратегия поиска с использованием итеративного процесса в консультации с группой проверки. Проведена экспертная оценка стратегии до ее реализации. Мы провели поиск в ряде баз данных, чтобы добиться междисциплинарного охвата. К ним относятся: Web of Science и базы данных Scopus и eLibrary. Мы выполнили все поиски по состоянию на 17 ноября 2020 года.

Мы скорректировали ключевые слова при поиске в базах данных. Мы ограничили результаты публикациями с 2001 г. по настоящее время.

Наш анализ данных включал как количественные (т. е. частоты и проценты), так и качественные

(т. е. тематический анализ) методы. Впоследствии каждое из утверждений, описывающих изменения белков в процессе длительного воздействия низких температур на качество мяса, были извлечены из включенных статей, были классифицированы с использованием созданного списка. Во время категоризации извлеченных утверждений, если утверждение не относилось к уже существующей в списке категории, добавлялась новая категория. Если из одной записи были извлечены повторяющиеся источники, мы классифицировали их только один раз.

Анализ и визуализация данных

Поиск статей российских исследователей производился на российском информационно-аналитическом портале eLibrary.ru по ключевым словам и по специализированным журналам по тематике «Пищевая промышленность», «Сельское и лесное хозяйство». Для поиска зарубежных источников использовали базы данных Scopus и Web of Science (WoS) по областям сельскохозяйственные и биологические науки, социальная сеть ResearchGate, сайт Международного Конгресса по вопросам науки и технологиям мяса¹.

Источники

В обзор включались данные опубликованных статей, обзоров, трудов научных конференций, материалов Международного Конгресса по вопросам науки и технологиям мяса (ICoMST), учебных пособий отечественных и зарубежных исследователей на русском и английском языке в период с 2009 по 2020 год. Было отобрано 45 источников для исследования.

Критерии включения и исключения источников

Поиск публикаций осуществлялся по ключевым словам: замороженное мясо, белки, свойства, качество, пищевая ценность, продукты окисления белка.

Отбор источников проводился по типу замороженного мяса (свинина, говядина, баранина), учитывая

¹ ICoMST. <http://icomst-proceedings.helsinki.fi/>

лись условия замораживания и хранения, наличие или отсутствие упаковки. При изучении публикаций по влиянию замораживания на биологическую ценность мяса акцент был сделан на длительные сроки хранения (от 12 мес. и более). Методы замораживания не учитывались, но указывались при наличии данной информации в статье. Далее публикации были ранжированы по наличию информации о биологической ценности и функционально-технологическим свойствам.

Предпочтение отдавалось публикациям, в которых объяснялись механизмы и закономерности происходящих изменений. При выявлении публикаций с однотипными результатами выбирались более поздние издания, либо той, в которой было представлено научное объяснение полученному результату или предположение, которое нуждается в дальнейшем доказательстве. Дополнительно проводился поиск источников, дополняющих знания о факторах влияния и механизмах, обуславливающих изменение белкового профиля и потерю функциональности белка. На следующем этапе дублирующие исследования были исключены. Оставшиеся 37 источников были проанализированы.

Извлечение и анализ данных

Были составлены таблицы для сравнения данных по биологической ценности замороженного мяса разных сроков хранения и упаковки (Таблица 1), а также проведено сравнение функционально-технологических свойств выдержанной/замороженной/размороженной свиной корейки (Таблица 2).

Извлечение и анализ данных

На основе ознакомления с публикациями материал был обобщен в смысловые кластеры по влиянию замораживания на биологическую ценность мяса и его функционально-технологические свойства. Дальнейшая более детальная классификация утверждений были сформированы в отдельные темы и преобразованы в разделы статьи: «Влияние замораживания и низкотемпературного хранения на биологическую ценность мяса», «Влияние замораживания и низкотемпературного хранения на биодоступность белковой системы мяса», «Влияние замораживания и низкотемпературного хране-

ния на функционально-технологические свойства мяса», «Влияние автолиза и условий замораживания на качество мяса». Существующие критерии для классификации данных дополнялись новыми, в случае, если они имели важное значение. Так в результате анализа объединения тематик была выявлена интересная и важная, на взгляд авторов, тема, которая тесно связана с тематикой обзора и способствовала пониманию описывающих в других разделах процессов: «Влияние замораживания и низкотемпературного хранения на окисление белка». Наиболее интересные данные были дифференцированы и описаны в статье более детально. Аналогичным образом проводилась работа по извлечению и анализу данных в рамках каждого раздела.

В целях визуализации данных была составлена таблица для сравнения данных по биологической ценности замороженного мяса разных сроков хранения и упаковки (Таблица 1). В таблицу включалась информация по срокам хранения мяса, температуре хранения и другим условиям, которые влияли на конечные показатели ценности мяса после хранения в замороженном виде. Интерес вызывали показатели изменения белковой системы, которые устанавливались поэтапно по мере анализа литературы (аминокислоты, показателей, характеризующих биологическую ценность). При анализе динамики изменения аминокислот, извлекались данные с указанием лимитирующих аминокислот, так как этот показатель является одним из основных, который характеризует биологическую ценность. Дополнительными критериями оценки биологической ценности стали аминокислотные индексы. Для облегчения восприятия результаты исследований по сравнению функционально-технологических свойств выдержанной/замороженной/размороженной свиной корейки были сведены в таблицу (Таблица 2).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Замораживание снижает качество пищевых продуктов. Это относится и к мясному сырью, которое для его консервации подвергается замораживанию. Замораживание, как любая технологическая обработка, влияет на структуру и состав основных нутриентов мясного сырья, в том числе белка, изменяя его пищевые и технологические свойства. Модификация белковой системы (фракционного

состава, аминокислотного состава, незаменимых аминокислот) изменяет функционально-технологические свойства мяса (величину pH, влагосвязывающую способность), которые обуславливают возможности и направления его дальнейшей переработки. Знание функционально-технологических свойств позволяет рационально использовать мясное сырье, прогнозировать и направленно регулировать качество готовой мясной продукции². Поэтому важно изучить научную информацию по влиянию замораживания и хранению мяса при низких отрицательных температурах на его основные характеристики (биологическую ценность и функционально-технологические свойства) и выявить направления исследований в этой области, вызывающие наибольший интерес отечественных и зарубежных ученых.

Влияние замораживания и низкотемпературного хранения на биологическую ценность мяса

Проведенные исследования по изучению содержания форм азота в результате замораживания, холодильного хранения и оттаивания мясного сырья, показали, что в результате холодильной обработки мяса происходит деструкция белковой и небелковой форм азота (белковый азот, пептидный, остаточный азот), причем в различных видах мяса эти изменения не одинаковы (Крылова & Густова, 2018). В образцах говядины и баранины отмечено снижение уровня пептидного азота (убыль для говядины и баранины составила 20–35 %) при одновременном увеличении остаточного азота. В свинине изменения форм азота менее выражены, чем в говядине. Было выдвинуто предположение, что это происходит в силу особенностей данного вида мяса и за счет содержания большего количества жировой ткани. Накопление пептидной формы азота в размороженной свинине составило 20 %, по сравнению с охлажденной, а содержание остаточного азота снизилось. Во всех видах мяса имело место незначительное снижение доли белкового азота (от 1,0 до 11,5 %). Более поздние исследования по изучению белковых фракций в процессе длительного хранения (1, 6 и 12 мес.), проведенные во ВНИИМП показали, что и в свинине и в говядине при низко-

температурном хранении наблюдалось увеличение низкомолекулярных фракций белка (16,8–18,0 кДа) к 12-му месяцу хранения. В образцах говядины охлажденной и замороженной (хранившейся 1 мес.) эти белковые фракции присутствовали в минимальном количестве. В говядине наблюдалось увеличение низкомолекулярных белков в большей степени, чем в свинине.

Данные специалистов, изучавших биологическую ценность белков различных видов мяса в процессе длительного низкотемпературного хранения, расходятся: одни фиксируют увеличение суммы незаменимых аминокислот (в сравнении с замороженным мясом) в свинине при хранении 27 мес. (Гурьева & Иванова, 2012) другие в свинине и говядине при 6 мес. хранения — их снижение (Лисицын и др., 2013). К концу 6 мес. хранения и в говядине и свинине сумма незаменимых аминокислот снизилась на 7,6 % и 10,7 % соответственно, что сказалось на снижении биологической ценности белка говядины и свинины (на 4,88 %, на 6,19 % соответственно). Зафиксировано снижение изолейцина, метионина и цистеина, фенилаланина, тирозина.

Необходимо отметить, что характер изменения содержания некоторых незаменимых аминокислот в процессе низкотемпературного хранения неодинаков. В основном происходит плавное снижение значений показателей незаменимых аминокислот. За исключением аспарагиновой кислоты, гистидина в говядине, глицина, аргинина в свинине, количество которых в течение 16-ти месяцев хранения увеличивалось.

Однако, изменение отдельных аминокислот протекает волнообразно. Анализ аминокислотного состава образцов говядины после 1-го, 6-ти, 12-ти и 16-ти месяцев хранения показал увеличение содержания лейцина и валина в говядине после 1-го месяца хранения и постепенное их снижение после 6-го месяца. К концу 16-го месяца хранения уровень этих аминокислот достиг фонового значения (перед замораживанием). Содержание тирозина в белке наоборот, резко снижалось (на 41,7 %) в течение 6-ти месяцев хранения, затем постепенно повышалось к 12-ти месяцам хранения, но не достигло фонового значения и оставалось неизменным в течение следующих 4 месяцев (Лисицын и др. 2013; Князева и др., 2017).

² *Мясная промышленность: Энциклопедический словарь.* (2015). М.: ВНИИМП им. В.М. Горбатова.

В образцах свинины динамика содержания незаменимых аминокислот лизина и валина была аналогичной лейцину и валину в говядине. Количество и лизина и валина к концу 6-го месяца хранения увеличивалось, а к концу хранения немного превышало значение этого показателя перед процессом замораживания. И в говядине и свинине, хранившихся в течение 6 мес. при температуре не выше минус 18°C, уровень пролина на последних этапах хранения (16 мес.) увеличился почти в 2 раза. Сумма незаменимых аминокислот уменьшилась примерно на 3 %. (Князева и др., 2017). Основные изменения незаменимых аминокислот происходят в течение первых 6-ти месяцев низкотемпературного хранения. Дальнейшее хранение при низких температурах не приводило к каким-либо значительным изменениям в деградации как незаменимых, так и заменимых аминокислот.

Результаты других исследований показывают, что при замораживании и размораживании свинины снижение суммы незаменимых аминокислот было более высокое (на 16,8%), и, в частности, отмечено

уменьшение содержания таких аминокислот как метионин, валин, фенилаланин и изолейцин (Крылова & Егоров, 2011).

Специалисты, оценивающие качество импортной свинины из Бразилии и Аргентины после холодильного хранения в течение 27 мес., отметили снижение биологической ценности свинины в среднем на 25 % (Таблица 1). Несмотря на увеличение суммы незаменимых аминокислот, лимитирующими аминокислотами для отрубов свинины (ококор, шейка, корейка) стали валин и метионин+цистеин, белково-качественный показатель (БКП) — 2,7; 1,2; 1,9 (соответственно); для баранины — метионин+цистеин, триптофан, БКП — в пределах 1 (Гурьева & Иванова, 2012).

В результате хранения замороженного мяса во всех исследуемых образцах серосодержащие аминокислоты (метионин и цистеин) были лимитирующими. Цистеин, как и метионин, является очень чувствительной аминокислотой почти ко всем активным формам кислорода, и их потеря в мясных

Таблица 1

Биологическая ценность замороженного мяса

	По данным ФГБУ НИИПХ Росрезерва (Гурьева & Иванова, 2012)		По данным ФНЦ пищевых систем им. В.М. Горбатова (Князева и др., 2017)	
Условия хранения	Баранина (Австралия) минус 25(±2) °С а) полимерная пленка б) без упаковки	Свинина в отрубах (Бразилия) полимерная пленка	Свинина (Россия) замороженные блоки, хранение при минус 18 °С	Говядина (Россия) замороженные блоки, хранение при минус 18 °С
Сроки хранения	27 мес.	18 мес. 27 мес.	16 мес.	16 мес.
Сумма НАК (не менее 40), г/100г	а) 38,5 б) 39,8		34,5	33,2
Лимитирующие НАК	фенилаланин + тирозин (а); метионин + цистеин, триптофан (а, б);	метионин + + цистеин, валин	метионин	цистеин
Аминокислотный индекс (НАК/ОАК стандарт. белка, >0,36)	0,42–0,44	0,4–0,45	0,39–0,42	0,35–0,40
Аминокислотный индекс (НАК/ЗАК, 0,56–0,67)		18 мес. — 0,74; 27 мес. — 0,73	0,62–0,75	0,59–0,67
Биологическая ценность, снижение, %		на 25 (в среднем)	на 6,2	на 4,9

системах может быть отражением специфического окислительного повреждения мясных белков (Soladoye et al, 2015).

Исследования окислительной модификации аминокислот в миофибриллярных белках, которые подвергали воздействию трех различных окислительных систем (железо-катализируемая окислительная система, липидная окислительная система и окислительная система метмиоглобина), показали, что цистеин единственный аминокислотный остаток, который имел тенденцию к снижению во всех трех окислительных системах. Причина в том, что тиольная группа остатка цистеина очень чувствительна к окислению (Bao & Ertbjerg, 2019).

Среди аминокислот цистеин, тирозин, фенилаланин, триптофан, гистидин, пролин, аргинин, лизин и метионин были описаны как особенно восприимчивые к активным формам кислорода (Lund et al., 2011).

При длительном хранении мяса в замороженном состоянии за счет связывания свободных аминокислот происходит убыль глютаминовой кислоты, треонина, валина, гистидина, аланина и др., участвующих в образовании вкуса и аромата вареного мяса. Поэтому длительное хранение замороженного мяса приводит к потере вкуса (Куцакова и др., 2011).

Происходят необратимые процессы изменения высокомолекулярных белков (парамиозин, миозин, миоген, и тропомиозин) и увеличение фракции низкомолекулярных белков (пептидов) (Лисицын и др., 2014) В говядине это увеличение (легких цепей миозина и миоглобина) наблюдалось в большей степени, чем в свинине (Князева и др., 2017). Наибольшим изменениям подвергались миофибриллярные белки, в первую очередь, миозин (Zhan et al., 2018), при этом актин практически оставался без изменений. Содержание миогена в результате длительного хранения резко уменьшалось: в свинине к концу срока хранения определены следы, в говядине его содержание снизилось в 2 раза (Князева и др., 2017).

Установлено заметное снижение количества белка в образце сырого фарша из мяса свинины *M. Longissimus dorsi* после замораживания при температуре минус 40°C (Chernukha & Akhremko, 2019). Тропомиозиновая бета-цепь, триозофосфат-изомераза 1 не были обнаружены после заморажива-

ния. Наблюдался дегенеративный эффект на легкие цепи миозина. В результате замораживания зафиксировано равномерное снижение карбоновой ангидразы 3, $\alpha\beta$ -кристаллина и легкой цепи миозина 1. Фракция тропомиозина альфа 1 в образце сохранилась. По другим данным более заметным изменениям подвергаются белки фракций миоальбумина и глобулина X. Белки фракций миогеновой группы наиболее устойчивы к воздействиям холодильной обработки мышц (Куцакова и др., 2011).

В результате изменения термического состояния и в процессе длительного низкотемпературного хранения белковая система мяса претерпевает некоторые химические изменения: агрегирование белков с постепенным снижением растворимости; изменение количества растворимого и остаточного азота, увеличение количества полипептидов и азотистых оснований, изменение количества незаменимых аминокислот и появление лимитирующих аминокислот.

Оценивая влияние процесса замораживания и длительного хранения на биологическую ценность белка, установлено, что процесс замораживания (при минус 16±2°C) играет большую роль на изменения белковых веществ, чем длительное хранение мяса в замороженном состоянии. Наиболее значительные изменения, приводящие к последующему снижению технологических свойств, наблюдались при хранении замороженного мяса свыше 6 мес. хранения (Князева и др., 2017).

Влияние замораживания и низкотемпературного хранения на окисление белка

За рубежом, в отличие от отечественных исследователей, изменились подходы к оценке биологической функции белков в пищевой системе. Качество белка не сводится к функции поддержания белковой массы тела, а изучается более широко, анализируя химическое и структурное состояние белков для выполнения ими основной деятельности в организме человека (Soladoye et al., 2015). Доказана роль диеты на окислительный стресс живого организма и его вклад в возникновение или предотвращение оксидативно-опосредованных патологий. Обсуждается формирование нового термина «диетический окислительный стресс», который

характеризует влияние диетических компонентов (избыток продуктов окисления и/или недостаток диетических антиоксидантов) на нарушение окислительно-восстановительного статуса у потребителя (Estévez & Xiong, 2019).

Это вызвано тем, что исследования в области медицины показали, взаимосвязь продуктов окисления белков, содержащиеся в потребляемой пище, с возрастными заболеваниями (Estévez & Xiong, 2019). Окислительные повреждения белка, в результате которого формируются карбонилированные белки, связывают с такими заболеваниями, как болезнь Альцгеймера, хроническую почечную недостаточность и диабет. Окислительное повреждение белков обычно рассматривается как первопричина развития заболеваний и отдельных их проявлений (Soladoye et al., 2015).

Поэтому в последние годы ученые более пристальное внимание стали уделять изучению процессов и механизмов повреждения белков, в том числе окислительным, методам оценки и определения специфических маркеров окислительных процессов, которые приводят к изменению структуры белковой системы, снижению пищевой ценности продукта (Soladoye et al., 2015).

К факторам, влияющим на окисление белков и аминокислот, относят: присутствие переходных металлов, миоглобина, продуктов окисления липидов, свободных радикалов, окислительных ферментов, а также характеристики окружающей среды, включая pH, температуру, активность воды и присутствие других промоторов и/или ингибиторов. Свет и облучение также способны инициировать окисление белков животного происхождения. На восприимчивость белков к процессам карбонилирования может влиять третичная структура белков, их размер, аминокислотный состав, последовательность и распределение аминокислоты в структуре белка (Soladoye et al., 2015; Leygonie et al., 2012; Estévez, 2011). Степень и скорость окисления белка при замораживании и оттаивании усиливают действие митохондриальных и лизосомальных ферментов, гемового железа и других прооксидантов, выделяемых при повреждении структуры клетки (Leygonie et al., 2012).

В процессе окисления белка происходит образование карбонильных соединений, дисульфидов, дитиозина и белковых радикалов, что способствует

изменению технологических, функциональных и пищевых свойств, и влияет на пищевую ценность, биологически активные эффекты белков и пептидов (Leygonie et al., 2012; Estévez, 2011).

Карбонилирование белков и образование белковых сшивок относят к наиболее важным факторам влияющих на потерю функциональности мышечного белка (Soladoye et al., 2015). Пока не установлены уровни карбонильных соединений, вызывающие негативные эффекты.

Зафиксировано увеличение уровня дитиозина и снижение содержания свободных аминокислот в результате изучения влияния многократных циклов замораживания-размораживания на миграцию влаги, повреждение микроструктуры и изменение структуры миофибриллярных белков в свиной мышце *Longissimus* (Xia et al., 2017). Большое влияние на образование дитиозина оказывает величина pH. Количество образованного дитиозина было намного выше при pH 5,5, чем при pH 7,0.

Уровень образования карбонильных групп является общим маркером окисления. Актуально установление специфических маркеров. Дитиозин рассматривался как маркер окисления белков в мясе. Однако, из-за ограниченных доступных знаний, дитиозин не может использоваться в качестве маркера окисления белка (Bao & Ertbjerg, 2019).

Для установления специфических маркеров оценивались отдельные виды карбонильных соединений (альфа-аминоадипиновый полуальдегид (AAS) и гамма-глутаминовый полуальдегид (GGS)) при низкотемпературном хранении. Анализ этих продуктов окисления показал, что они могут быть вовлечены в дальнейшие реакции, но в течение хранения не стабильны. Отмечено их резкое увеличение в течение первых 2 месяцев хранения, в то время как к 4 месяцу морозильного хранения их уровень значительно снижался (Estévez et al., 2009).

Хранение как в охлажденном, так и в замороженном виде влияет на уровень окисленного белка и деградацию белковой структуры говядины. Зафиксировано максимальное содержание карбонильных соединений к 8 неделям хранения образцов говядины в замороженном виде, которое затем снижалось до первоначального уровня (Benjamin et al., 2018).

Отмечено увеличение уровня карбонильных соединений в свинине, подвергнутой 5 циклам замораживания / оттаивания (от 1,09 до 1,16 нмоль / мг белка). Карбонилирование мясных белков при хранении в замороженном виде, в том числе связано с возникновением окислительных реакций жирных кислот, и зависит от типа мышц, температуры заморозки, условий упаковки и предварительных операций, например, измельчения (Xia et al., 2009).

Образование карбонильных белков включает необратимую окислительную модификацию таких незаменимых аминокислот, как лизин, аргинин и треонин. Эти аминокислоты в основном находятся в миофибриллах и являются ответственными за большинство физико-химических свойств мышечной пищи. Окисление белка дестабилизирует белковый матрикс, приводя к изменению вязкости и потере мясного сока (Leygonie et al., 2012), а также к снижению влагосвязывающей способности и способности формирования нежной и сочной текстуры, ухудшению вкуса (Estévez, 2011; Lund et al., 2011).

Окисление белков вызывает изменения в гидрофобности белка, конформации и растворимости, изменяет восприимчивость белковых субстратов к протеолитическим ферментам. Это, в свою очередь, является причиной низкой усвояемости, и, следовательно, меньшей пищевой ценности окисленных белков. Установлено также, что карбонильные белки, полученные в результате окисления, являются реакционноспособными (Chernukha & Akhremko, 2019; Lund et al., 2011; Bao & Ertbjerg, 2019; Estévez & Xiong, 2019).

Существует тесная взаимосвязь между окислением белков и денатурацией белка. Белок миозин был наиболее подвержен заморозке, а миофибрилярные белки подвергались денатурации независимо от скорости заморозки, вызывая разворачивание белка и, как следствие, снижение энтальпии. Причем медленное замораживание вызывает более выраженную денатурацию белка, чем быстрое замораживание (Leygonie et al., 2012). Основной причиной денатурации миофибрилярного белка в замороженном-размороженном мясе является воздействие пониженного pH в сочетании с высокими концентрациями растворенных веществ в незамерзшей воде замороженного мяса (Zhang et al., 2021).

Интерес вызывают исследования, в которых изучается сочетаемость различных последовательностей процессов охлаждения и замораживания для длительного хранения мяса, и эффект, оказывающий на окисление и деградацию белка (Coombs et al., 2017).

Влияние замораживания и низкотемпературного хранения на биодоступность белковой системы мяса

Превращения белков могут отразиться на устойчивости белков к действию пищеварительных ферментов (Leygonie et al., 2012; Estévez, 2011; Kral et al., 2016).

В замороженном мясе медленно, но продолжают протекать автолитические процессы. Активность протеолитических ферментов катепсинов и кальпаинов в замороженном мясе зависит от многих факторов, важнейшими из которых являются состояние мяса до замораживания, технологические режимы процесса и продолжительность хранения. Кроме того, процессы замораживания—размораживания приводят к выделению некоторых изоферментов. Изучалось влияние температуры замораживания на активность протеолитических ферментов при длительном хранении мяса, замороженного в парном и созревшем состоянии (Колодязная & Бараненко, 2012).

Выявлено, что протеолитическая активность экстракта, содержащего саркоплазматические белки и экстрагированные вещества, (растворимые при малой ионной силе $\mu = 0,08$ и $pH = 7,4$) и содержащего фибриллярные белки актомиозинового комплекса (растворимые при $\mu = 0,6$ и $pH = 8,6$) увеличивается при замораживании мяса, особенно парного. Большая часть протеолитических ферментов сосредоточена в экстракте саркоплазматических белков. В нём содержатся ферменты плазмы и лизосом, разрушенных в момент нарушения целостности ткани при замораживании и выделении белков. Исходное состояние мяса до замораживания влияет не только на общий уровень, но и на характер изменения активности от продолжительности хранения. Установлено, что ферментативная активность экстракта саркоплазматических белков выше при более низких температурах хранения мяса (минус $28^{\circ}C$). Степень разрушения соединительной ткани и протеолитическая активность экстрактов взаи-

мосвязаны: чем больше разрушена соединительная ткань, тем ниже протеолитическая активность, особенно, для ферментов, экстрагируемых вместе с фибриллярными белками.

С целью прогнозирования пищевых свойств мясного продукта с минимальными потерями пищевой ценности при замораживании были проведены исследования, направленные на оценку влияния хранения в замороженном и охлажденном виде на 1) свободный Ca^{2+} , активность кальпаина-1 и -2 и активность протеасом и 2) удержание воды (потеря мясного сока, потери при варке, общая потеря влаги и влагосвязывающая способность миофибрилл) и сила сдвига мышц свинной *longissimus thoracis et lumborum* (Zhang & Ertbjerg, 2018).

Было установлено, что процессы замораживания-оттаивания длинных мышц свинины привели к значительному выделению свободного Ca^{2+} , возможно, из-за ускоренной утечки через поврежденные мембраны, вызванные кристаллами льда. Свободный Ca^{2+} увеличился больше в свинине по сравнению с бараниной и говядиной. Последующее охлажденное хранение ускорило снижение извлекаемой активности кальпаина-1 и активировало около 50 % кальпаина-2. Около 40 % протеасомной активности первоначально снизилось из-за потери мясного сока.

Хранение мяса в замороженном и охлажденном виде может быть способом активации кальпаина-1 и -2 из свинины, и возможностью влияния на процесс тендеризации мяса без чрезмерного количества воды (Kim et al., 2018).

Происходящие изменения белковой системы оказывают влияние на ее биодоступность. С целью оценки влияния денатурационных процессов, происходящих в замороженном мясе в процессе хранения, на биологическую ценность белков и их усвояемость, определяли растворимость и протеолиз белков мяса в цикле «замораживание — хранение — тепловая обработка» под действием ферментов трипсина и химотрипсина («Самсон-Мед») (Бараненко & Салами, 2014). Полусухожильные мышцы (*Musculus semitendinosus*) говядины в парном (через 2–3 ч после убоя) и созревшем состоянии (после выдержки при температуре 12 °С в течение 48 ч) замораживали при температуре минус 29 ± 1 °С и хранили при этой же температуре в течение 7 мес.

Характер структурных изменений был идентичен для двух групп белков (фибриллярные и саркоплазматические) и зависел от состояния мяса до замораживания. Фибриллярные белки гидролизуются трипсином и химотрипсином в наибольшей мере. Максимальная атакуемость ферментами характерна для саркоплазматических и фибриллярных белков мяса, замороженного после ферментации и, особенно, после их тепловой обработки. При замораживании и хранении созревшего мяса повышается атакуемость фибриллярных белков трипсином и химотрипсином, саркоплазматических белков — химотрипсином и снижается атакуемость трипсином. Было установлено, что денатурационные процессы, которые происходят при замораживании и хранении парного и ферментированного мяса при температуре минус 29 ± 1 °С не оказывают отрицательного влияния на общую усвояемость (перевариваемость) белков мяса.

К такому же выводу пришли специалисты, изучавшие переваримость методом *in vitro* замороженного мяса длительного хранения. Показатели переваримости говядины и свинины через 15 мес. хранения при минус 18 °С показали незначительные снижения (в говядине через 1 месяц хранения, переваримость по пепсину составила 6,6 мг/100 г, по трипсину — 8,7 мг/100 г, через 15 месяцев хранения — 6,0 мг/100 г и 7,4 мг/100 г, соответственно; у свинины через 1 месяц хранения переваримость по пепсину составила 6,4 мг/100 г, по трипсину — 7,4 мг/100 г, а через 15 месяцев хранения: по пепсину — 5,8 мг/100 г, по трипсину — 7,2 мг/100 г).

Влияние замораживания и низкотемпературного хранения на функционально-технологические свойства мяса

Процессы длительного низкотемпературного хранения и размораживания влияют на величину pH, которая оказывает воздействие на такие параметры качества как цвет, нежность, влагосвязывающая способность, стойкость при хранении.

Некоторые исследователи объясняют изменения pH тем, что в результате потери мясного сока при оттаивании происходит убыль минералов и белковых соединений, приводящее к ионно-

му нарушению баланса в мышечной ткани, и как результат снижению значения pH (Rahman et al., 2015; Jeong et al., 2011; Leygonie et al., 2012).

В исследованиях по влиянию многократного нарушения непрерывности холодовой цепи в течение первых 10 циклов замораживания-оттаивания было зафиксировано снижение показателя pH, но затем его увеличение в период 5 дальнейших циклов (Jun et al., 2012). В данном исследовании многократное замораживание и оттаивание оказывало «тендеризационный эффект» мышц *longissimus dorsi* баранины, упакованных в вакуум и замороженных при минус 18°C, также вызывали ухудшение цвета и технологических свойств, что снижало коммерческие и технологические характеристики важные для отрасли.

Колебания температуры во время хранения замороженных продуктов вызывают серьезные проблемы с качеством, поэтому являются постоянной темой для исследований. В результате температурных колебаний при многократных циклах замораживания-размораживания мяса установлено изменение вторичных и третичных структур миофибриллярных белков, ослабление спиральной структуры миофибриллярного белка и разворачивание третичной структуры (Xia et al., 2017). С сохранностью третичной структуры связаны все биологические свойства белков и их функциональность. Следовательно, повторное замораживание и оттаивание должны быть сведены к минимуму в период всего срока холодильного хранения.

Не зависимо от группы качества мяса (*NOR*, *PSE*, *DFD*) и гендерного фактора (боровки и свинки) величина pH снижалась в процессе хранения мяса в вакуумной упаковке при температуре минус 18°C в течение 6 месяцев. Причем динамика снижения pH у мяса с пороком качества *PSE* была минимальной, а в образцах мяса, полученного от свинок, этот показатель практически не изменялся за 6 месяцев хранения, по сравнению с образцами мяса, полученного от боровков (Милеенкова и др., 2020).

Данные других исследований показывают противоположные результаты влияния процессов замораживания и размораживания на pH. Было установлено, что уровень pH достоверно увеличивался при хранении ($p \leq 0,001$) (5,51 — охлажденная свинина и 5,65 — замороженная) образцов сви-

нины (*M.longissimus et lumborum*), в течение 2 лет в вакуумной упаковке. Авторы статьи объясняют этот факт тем, что микроорганизмы и эндогенные ферменты разрушают мясные белки, вырабатывают аммоний, органические сульфиды и амины, которые способствуют повышению pH (Alonso et al., 2013). Длительное хранение в замороженном виде изменило изоэлектрическую точку белков (денатурация белков), что привело к увеличению значений pH (Alonso et al., 2016). Увеличение количества свободных аминокислот (например, глутамина и фенилаланина) и дипептидов (карнозин и ансерин), которые увеличивали буферную емкость, также способствует повышению pH (Zequan et al., 2019).

Сроки хранения мяса при низких температурах играют немаловажную роль и влияют на изменение качества. Исследования по оценке влияния продолжительности хранения (до 18 недель) свинины *NOR* и *PSE* при низкой температуре (минус 18°C) на качественные характеристики показали, что время хранения влияет на все измеряемые качественные параметры (pH, потери при оттаивании, уровень общего летучего основного азота, сила сдвига и мышечная структура). Установлен смягчающий эффект, наблюдаемый на 3 и 6 неделе в *PSE* образцах *M.longissimus et lumborum*, но после этого образцы стали более жесткими при хранении в замороженном виде. Был сделан вывод, что хранение в течение 6 недель для свинины *PSE* и 9 недель для свинины *NOR* при минус 18 °C не снижает качество мяса (Zequan et al., 2019). Образцы свинины *NOR* и *PSE* не отличались после 9 недель хранения.

Изменение нативного состояния белка влияет на влагосвязывающую способность (ВСС) мяса.

Анализ данных по изменению ВСС различных видов отрубов (ококор, корейка, шейка) свинины в состоянии глубокой заморозки (при температуре минус 24,4 °C $\pm 1,5$ и влажности воздуха 60–70 %) показал, что в результате длительного хранения (27 мес.) наблюдалось небольшое снижение влагосвязывающей способности. Причем изменение этого показателя в различных отрубках было неодинаково (Гурьева & Иванова, 2012).

Отрицательно влиять на ВСС, сочность и нежность мышечной пищи может снижение протеолити-

ческой активности тендеризирующих ферментов и сшивка миофибриллярных белков (Lund et al., 2011), а также модификация и/или денатурация белка. Изучение белкового состава капельных потерь, показали, что их основу составляют, в основном, саркоплазматические белки (Leygonie et al., 2012).

Изучая взаимосвязь между карбонилированием белка и потерей ВСС, происходящей во время холодильного хранения (минус 18°C/12 недель) мышц свиньи в двух разных типах мышц (гликолитическому *M.longissimus dorsi* и окислительному *M.psoas major*) было установлено, что образование белковых карбонильных соединений происходило одновременно с потерей влагосвязывающей способности, причем более интенсивно эти процессы происходили в гликолитических видах мышц, измельченном сырье и в мясе, упакованном в кислородопроницаемые мешки (Medića et al., 2018). Тип мышц необходимо учитывать при подборе режимов и длительности низкотемпературного хранения, так как установлена корреляция с жесткостью мяса, ВСС и потерями влаги. Определение точного механизма, с помощью которого продукты окисления белков могут влиять на потерю ВСС замороженного мяса, имеет большое значение из-за огромного экономического эффекта этого явления на мировую мясную индустрию (Estévez, 2011).

Экспериментально установлено, что ВСС мяса изменилась с 75,70 % (в охлажденном мясе) при первичном замораживании-размораживании (минус 35 °C) до 72,00%, а при вторичном (минус 35 °C) дополнительно уменьшилась на 0,88 %. При вторичном замораживании при минус 18 °C ВСС уменьшилась на 1,95 %. Показатели ВСС в случаях замораживания при минус 35 и минус 18 °C отличались в 2 и 1,6 раза. Третий цикл замораживания—оттаивания приводил к дальнейшему снижению качества мясного сырья, хотя и в меньшей, чем при повторном воздействии, степени (Хвыля и др., 2019).

Отрицательное влияние окислительных процессов можно нивелировать за счет таких технологических приемов, как введение рассола, маринование мяса и последующей кулинарной обработки (Lund et al., 2011).

Влияние автолиза и условий замораживания на качество мяса

Минимальные нарушения структуры при замораживании мяса происходят на ранних стадиях автолиза. Наибольшие нарушения морфологической структуры имеют место в случае замораживания мяса в состоянии посмертного окоченения. Самым оптимальным вариантом в работе с мясом является его переработка на ранних стадиях автолиза, а именно, через 30–36 часов и высоком pH. При замораживании мясных изделий (полуфабрикатов) приготовленных из созревшего мяса отмечаются большие потери мясного сока, что можно объяснить нарушением структуры тканей в процессе созревания (Хортиев и др., 2017).

Интересные данные получены в исследовании по оценке последовательности процессов созревания, замораживания и скорости замерзания на качество свиной корейки (*M.longissimus lumborum*) (Kim et al., 2018). Исследованию подвергались образцы мяса, подготовленных следующим образом: FT, замораживание/оттаивание; AFT, созревание до замораживания/оттаивание; и FTA, замораживание/оттаивание и созревание с 2 темпами замораживания (медленным и быстрым замораживанием). Результаты исследований приведены в Таблице 2.

Авторы установили, что все образцы показали снижение pH независимо от последовательности созревания и замораживания по сравнению со значением pH за 1 день после убоя (pH 5,5).

Скорость замерзания не влияла на значения тиобарбитуро-реактивных веществ (TBARS). Наибольшие значения в конце хранения (8 день) имели образцы AFT, т.е. созревание до замораживания оказывало более негативное влияние на устойчивость к окислению липидов.

Содержание карбонильных соединений на начальном этапе исследований (день 0) у всех образцов были практически одинаковы. Самые высокие показатели имели образцы, холодильная обработка которых проходила при медленной скорости замораживания мяса, причем образцы, подверженные созреванию имели более высокие показатели содержания карбониллов. Максимальное увеличение содержания карбониллов зафиксировано в образце

Таблица 2

Функционально-технологические свойства выдержанной/замороженной/размороженной свинной корейки

Показатели	FT (медленное)	FT (быстрое)	AFT (медленное)	AFT (быстрое)	FTA (медленное)	FTA (быстрое)
pH	5,48	5,46	5,51	5,51	5,42	5,48
TBARS	Минимальное		Максимальное		Среднее	
Окисление белков на 8-й день хранения (карбонильные соединения, нмоль/мг белка)	Минимальное, более высокий показатель при медленном замораживании		Среднее, более высокие показатели при быстром замораживании		Максимальное, хранение при мед. замораживании приводит к максимальному уровню показателя	
Сила сдвига	41,3	40,4	34,6	34,5	29,9	35,0
Потери при оттаивании	10,7	6,3	7,9	7,8	12,9	11,8
Потери при варке	25,7	23,6	26,9	25,8	24,0	24,7
Общая потеря экссудата	36,5	30,0	34,8	33,5	36,9	36,5
Капельные потери	8,5	5,6	2,7	2,7	2,2	1,8
Потеря веса	7,8	6,8	4,7	3,6	3,0	1,5

FTA при медленном замораживании, что может быть результатом повышенной денатурации белка и/или структурных изменений из-за медленного замораживания.

Низкие значения силы сдвига в образце *FTA* (при медленной скорости замерзания) объясняются авторами за счет физического крио-повреждения мышечного волокна в сочетании с протеолизом при автолизе.

Результаты, полученные в данном исследовании, показали, что последовательность созревания играет значительную роль при оценке качества замороженного мяса. Последовательность процессов: созревание, затем быстрое замораживание могут быть одним из наиболее эффективных способов минимизации дефектов качества, связанных с замораживанием/оттаиванием.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В результате анализа литературы российских и зарубежных ученых авторами были установлены направления исследований в области качества замороженного мяса, к которым проявлялся научный интерес: влияние замораживания и низкотемпературного хранения на биологическую ценность мяса, окисление белка, биодоступность белковой системы мяса, функционально-технологические свойства мяса, а также влияние автолиза и условий замораживания на качество мяса.

Замораживание и низкотемпературное хранение мяса приводит к модификации белковой системы мяса, изменяя аминокислотный, фракционный составы и структуру белка, что снижает биологическую ценность сырья. Большинство незаменимых аминокислот восприимчивы к активным формам кислорода. Серосодержащие аминокислоты (метионин и цистеин), наиболее подвержены окислительному воздействию. Для всех видов замороженного мяса серосодержащие аминокислоты зафиксированы в наименьшем количестве по сравнению с их физиологической потребностью.

Результаты исследований биологической ценности мяса, замороженного и хранившегося при низких температурах, указывают на ее снижение, но значения этого показателя у разных авторов сильно различаются. Условия замораживания, хранения и размораживания перед исследованием образцов, возможно, могут быть причиной в расхождении показателей.

Не отмечено значительного снижения переваримости мясного сырья при его замораживании и его длительном низкотемпературном хранении. На переваримость белков замороженного мяса (при температуре минус $29 \pm 1^\circ\text{C}$) не влияет его состояние (парное, ферментированное) до замораживания.

При длительном хранении мяса (свинины и говядины) в замороженном виде происходят необратимые процессы изменения высокомолекулярных белков, в первую очередь, миофибриллярных, ответственных за функционально-технологические и органолептические свойства. При хранении мяса свыше 6 месяцев наблюдаются изменения, приводящие к наибольшему снижению технологических свойств. Были получены противоречивые результаты по изменению величины pH мяса в результате замораживания. Одни авторы в своих экспериментах фиксировали снижение этого показателя, другие — его увеличение или стабильность. Необходимы дальнейшие исследования для научного объяснения полученных в разных экспериментах результатов по динамике изменения одного из основных технологических показателей (pH) мяса в процессе морозильного хранения.

Влагосвязывающая способность мяса, один из показателей, характеризующих технологические свойства мяса, и обуславливающий нежность и сочность готового мясного продукта. Причиной снижения влагосвязывающей способности мяса являются окислительные процессы, приводящие к модификации незаменимых аминокислот (лизин, аргинин и треонин), которые ответственны за физико-химические свойства белковой системы мяса. Причем изменение данного показателя в различных отрубках неодинаково. Интенсивность его изменения также зависит от вида мышц, упаковки и степени измельчения сырья.

Замораживание способствует накоплению низкомолекулярных белков. Этот факт интересен для дальнейшего более детального изучения с целью выделения пептидов, обладающих функциональными свойствами, и их использования для придания пищевым продуктам функциональных, оздоравливающих свойств (Лисицын и др., 2018).

Особое внимание зарубежных исследователей обращено изучению механизмов окислительной модификации белков, продукты которых являются не только причиной потери биологической ценности мяса и его функционально-технологических свойств, но и негативно сказываются на здоровье потребителя. Установленная взаимосвязь продуктов окисления белков, содержащихся в потребляемой пище, с возрастными заболеваниями, активизировало работы по изучению влияния замораживания и колебания температур при морозильном хранении на образование продуктов окисления белков. Для регулирования окислительных процессов изучаются специфические маркеры и определяются уровни продуктов окисления белка, вызывающие неблагоприятные эффекты на организм человека.

Температурные колебания при холодильном хранении мяса оказывают негативное влияние на качество. Установлено, что температурные колебания в результате многократных циклов замораживания-размораживания во время хранения сырья усиливают изменения структуры миофибриллярных белков, приводят к увеличению уровня продуктов окисления белка, снижая тем самым пищевое качество мяса и его функционально-технологические свойства.

В целях минимизации дефектов качества при замораживании рекомендуется учитывать совокупность факторов: стадию автолиза и уровень pH мяса, при котором замораживалось мясное сырье, а также скорость замораживания. Все вышеперечисленные направления исследований актуальны для более детального междисциплинарного изучения, затрагивающего аспекты биохимии, нутрициологии и медицины, в целях разработки методов нивелирования негативных эффектов, снижающих качество мяса, в процессе его замораживания и длительного морозильного хранения.

ВЫВОДЫ

Анализ научной информации показал, что исследование российских ученых направлены на изучение качества мясного сырья (свинины, говядины, баранины), подвергнутого длительному хранению при низких отрицательных температурах, оценку биологической ценности мясного белка. Зарубежные исследователи акцентируют свое внимание на выявлении механизмов повреждения белков и процессов, приводящих к утрате их биологической активности

в результате замораживания и холодильного хранения. Полученные знания позволяют понять причины изменения технологических, органолептических и пищевых свойств замороженного мяса и усовершенствовать процессы холодильной обработки для достижения максимальной сохранности качества. Существует явная потребность в публикациях более узконаправленных обзоров отечественных авторов, помогающих повысить информированность исследователей в отношении последних достижений российской и мировой науки в данной области.

ЛИТЕРАТУРА

- Бараненко, Д. А., & Салами, М. (2014). Изменение белковой фракции говядины в цикле замораживание-хранение-тепловая обработка. *Вестник международной академии холода*, (4), 15–18.
- Гурьева, К. Б., & Иванова, Е. В. (2012). Биологическая ценность белков замороженного мяса после хранения. *Мясные технологии*, 3, 46–49.
- Князева, А. С., Вострикова, Н. Л., Иванкин, А. Н., & Куликовский А. В. (2017). Оценка биологической ценности мясного белка при хранении замороженного мяса. *Все о мясе*, 2, 36–39.
- Колодязная, В. С., & Бараненко, Д. А. (2012). Протеолитическая активность белковых фракций мяса при замораживании и хранении. В *Инновации в науке, образовании и бизнесе–2012: Труды X Международной научной конференции* (ч. 2, с. 410–413). Калининград: КГТУ.
- Крылова, В. Б., & Густова, Т. В. (2018). К вопросу ароматообразования мясных консервов. В *Перспективные технологии хранения и переработки сельскохозяйственной продукции: Научные труды Северо-Кавказского федерального научного центра садоводства, виноградарства, виноделия* (с. 153–160). Краснодар: ФГБНУ СКФНЦСВВ.
- Крылова, В. Б., & Егоров, О. В. (2011). Влияние термического состояния свинины на азотистые вещества консервов «Свинина тушеная». В *Актуальные проблемы в области создания инновационных технологий хранения сельскохозяйственного сырья и пищевых продуктов: Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции* (с. 109–111). М.: Российская академия сельскохозяйственных наук.
- Лисицын, А. Б., Иванкин, А. Н., Вострикова, Н. Л., & Становова, И. А. (2014). Изучение фракционного состава белков мяса в процессе длительного холодильного хранения. *Все о мясе*, (2), 36–40.
- Лисицын, А. Б., Чернуха, И. М., Вострикова, Н. Л., & Горбунова, Н. А. (2013). Изучение влияния низкотемпературного хранения на аминокислотный состав мяса. В *Инновационные технологии в производстве и переработке сельскохозяйственной продукции в условиях ВТО: Материалы Международной научно-практической конференции* (с. 9–12). Волгоград: ВГТУ.
- Милеенкова, Е. В., Кузнецова, Т. Г., & Насонова, В. В. (2020). Изучение влияния замораживания на показатели качества мясного сырья, полученного от свинины с различным течением автолиза. *Все о мясе*, (2), 45–49. <https://doi.org/10.21323/2071-2499-2020-2-45-49>
- Хвыля, С. И., Корешков, В. Н., Лапшин, В. А., & Хохлова, Л. М. (2018). Характер льдообразования при замораживании мышечной ткани (мяса) рыбы, птицы и убойных животных. В *Перспективные технологии хранения и переработки сельскохозяйственной продукции: Научные труды Северо-Кавказского федерального научного центра садоводства, виноградарства, виноделия* (т. 20, с. 88–92). Краснодар: ФГБНУ СКФНЦСВВ.
- Хвыля, С. И., Корешков, В. Н., Лапшин, В. А., & Гиро, Т. М. (2019). Влияние неоднократного замораживания-размораживания на качество мясного сырья. *Холодильная техника*, (1), 46–49.
- Хортиев, З. А., Хамицаева, А. С., & Будаев, Ф. И. (2017). Изменение свойств мяса при замораживании и последующем хранении. В *Достижения науки — сельскому хозяйству: Сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции* (с. 202–206). Владикавказ: ГТАУ.
- Alonso, V., Muela, E., Tenas, J., Calanche, J. B., Roncalés, P., & Beltrán, J. A. (2016). Changes in physicochemical properties and fatty acid composition of pork following long-term frozen storage. *European Food Research and Technology*, 242(12), 2119–2127. <https://doi.org/10.1007/s00217-016-2708-y>
- Bao, Y., & Ertbjerg, P. (2019). Effects of protein oxidation on the texture and water-holding of meat: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 59(22), 3564–3578. <https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1498444>
- Chernukha, I. M., & Akhremko, A. G. (2019). Assessing the effect of thermal treatment on meat proteins using proteomic methods. *Theory and Practice of Meat Processing*, 4(3), 4–6. <https://doi.org/10.21323/2414-438X-2019-4-3-4-6>

- Coombs, C. E. O., Holman, B. W. B., Friend, M. A., & Hopkins, D. L. (2017). Long-term red meat preservation using chilled and frozen storage combinations: A review. *Meat Science*, 125, 84–94. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2016.11.025>
- Estévez, M. (2011). Protein carbonyls in meat systems: A review. *Meat Science*, 89(3), 259–279. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2011.04.025>
- Estévez, M., & Xiong, Y. (2019). Intake of Oxidized Proteins and Amino Acids and Causative Oxidative Stress and Disease: Recent Scientific Evidences and Hypotheses. *Journal of Food Science*, 84(3), 387–396. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.14460>
- Estévez, M., Ollilainen, V., & Heinonen, M. (2009). Analysis of protein oxidation markers alpha-Aminoadipic and gamma-Glutamic semialdehydes in food proteins using liquid chromatography (LC)-Electrospray Ionization (ESI)-Multistage tandem mass spectrometry (MS). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 57(9), 3901–3910. <https://doi.org/10.1021/jf804017p>
- Holman, B. W. B., Coombs, C. E. O., Morris, S., Kerr, M. J., & Hopkins, D. L. (2018). Effect of long term chilled (up to 5 weeks) then frozen (up to 12 months) storage at two different sub-zero holding temperatures on beef: Protein structure degradation and a marker of protein oxidation. *Meat Science*, 139, 171–178. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2018.01.028>
- Jeong, J. Y., Kim, G. D., Yan, H. S., & Joo, S. T. (2011). Effect of freeze-thaw cycles on physicochemical properties and color stability of beef semimembranosus muscle. *Food Research International*, 44(10), 3222–3228. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2011.08.023>
- Kim, H.-W., Kim, J.-H., Seo, J.-K., Setyabrata, D., & Kim, Y. H. B. (2018). Effects of aging/freezing sequence and freezing rate on meat quality and oxidative stability of pork loins. *Meat Science*, 139, 162–170. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2018.01.024>
- Kral, M., Honzirkova, K., Tremlova, B., & Zdarsky, M. (2016). The effect of conventional and shock freezing on drip loss and textural parameters of beef meat. *Theory and Practice Meat Processing*, 1(1), 6–9. <https://doi.org/10.21323/2114-441X-2016-1-06-09>
- Leygonie, C., Britz, T. J., & Hoffman, L. C. (2012). Impact of freezing and thawing on the quality of meat: Review. *Meat Science*, 91(2), 93–98. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2012.01.013>
- Leygonie, C., Britz, T. J., & Hoffman, L. C. (2012). Meat quality comparison between fresh and frozen/thawed ostrich *M. iliofibularis*. *Meat Science*, 91(3), 364–368. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2012.02.020>
- Lund, M., Heinonen, M., Baron, C. P., & Estevez, M. (2011). Protein oxidation in muscle foods: A review. *Molecular Nutrition & Food Research*, 55(1), 83–95. <https://doi.org/10.1002/mnfr.201000453>
- Medića, H., Kušecb, I. D., Pleadinc, J., Kozacinskid, L., Njarid, B., Hengle, B., & Kušec, G. (2018). The impact of frozen storage duration on physical, chemical and microbiological properties of pork. *Meat Science*, 140, 119–127. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2018.03.006>
- Qi, J., Li, C., Chen, Y., Gao, F., Xu, X., & Zhou, G. (2012). Changes in meat quality of ovine longissimus dorsi muscle in response to repeated freeze and thaw. *Meat Science*, 92(4), 619–626. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2012.06.009>
- Rahman, M. H., Hossain, M. M., Rahman, S. M. E., Amin, M. R., & Oh, D.-H. (2015). Evaluation of Physicochemical Deterioration and Lipid Oxidation of Beef Muscle Affected by Freeze-thaw Cycle. *Food Science of Animal Resources*, 35(6), 772–782. <https://doi.org/10.5851/kosfa.2015.35.6.772>
- Soladoye, O. P., Juarez, M. L., Aalhus, J. L., Shand, P., & Estevez, M. (2015). Protein oxidation in processed meat: Mechanisms and potential implications on human health. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 14(2), 106–122. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12127>
- Xia, X., Kong, B., Liu, Q., & Liu, J. (2009). Physicochemical change and protein oxidation in porcine longissimus dorsi as influenced by different freeze-thaw cycles. *Meat Science*, 83(2), 239–245. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2009.05.003>
- Xia, X., Zhang, M., Li, F., & Kong, B. (2017). Protein structure changes in porcine longissimus muscle as Influenced by multiple freeze-thaw cycles. In *63rd International Congress of Meat Science and Technology* (pp. 117–118). Cork, Ireland.
- Xiong, Y. I. (2000). Protein oxidation and implications for muscle food quality. In E. Decker, & C. Faustman (Eds.) *Antioxidants in Muscle Foods* (pp. 85–111). UK: John Wiley & Sons.
- Zequan, X., Zirong, W., Jiankun, L., Xin, M., Hopkins, D. L., Holman, B. W. B., & Bekhit, A. E.-D. A. (2019). The effect of freezing time on the quality of normal and pale, soft and exudative (PSE)-like pork. *Meat Science*, 152, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2019.02.003>
- Zhan, X., Sun, D.-W., Zhu, Z., & Wang, Q.-J. (2018). Improving the quality and safety of frozen muscle foods by emerging freezing technologies: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 58(17), 2925–2938. <https://doi.org/10.1080/10408398.2017.1345854>
- Zhang, Y., & Ertbjerg, P. (2018). Effects of frozen-then-chilled storage on proteolytic enzyme activity and water-holding capacity of pork loin. *Meat Science*, 145, 375–382. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2018.07.017>
- Zhang, Y., Puolanne, E., & Ertbjerg, P. (2021). Mimicking myofibrillar protein denaturation in frozen-thawed meat: Effect of pH at high ionic strength. *Food Chemistry*, 338, Article

REFERENCES

- Baranenko, D. A., & Salami, M. (2014). Izmenenie belkovoi fraktsii govyadiny v tsikle zamorazhivanie-khraneniye-teplovaya obrabotka [Changes in the protein fraction of beef in the cycle of freezing-storage-heat treatment]. *Vestnik mezhdunarodnoi akademii kholoda [Bulletin of the International Academy of Refrigeration]*, (4), 15–18.
- Gur'eva, K. B., & Ivanova, E. V. (2012). Biologicheskaya tsennost' belkov zamorozhennogo myasa posle khraneniya [Biological value of frozen meat proteins after storage]. *Myasnye tekhnologii [Meat Technologies]*, (3), 46–49.
- Khortiev, Z. A., Khamitsaeva, A. S., & Budaev, F. I. (2017). Izmenenie svoystv myasa pri zamorazhivani i posleduyushchem khraneni [Changes in the properties of meat during freezing and subsequent storage]. In *Dostizheniya nauki — sel'skomu khozyaystvu: Sbornik trudov Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii [Achievements of Science — Agriculture: Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference]* (pp. 202–206). Vladikavkaz: GGAU.
- Khvylya, S. I., Koreshkov, V. N., Lapshin, V. A., & Giro, T. M. (2019). Vliyanie neodnokratnogo zamorazhivaniya-razmorazhivaniya na kachestvo myasnogo syr'ya [Effect of repeated freezing-thawing on the quality of meat raw materials]. *Kholodil'naya tekhnika*, (1), 46–49.
- Khvylya, S. I., Koreshkov, V. N., Lapshin, V. A., & Khokhlova, L. M. (2018). Kharakter l'dobrazovaniya pri zamorazhivani myshechnoi tkani (myasa) ryby, ptitsy i uboinykh zhivotnykh [The nature of ice formation during freezing of muscle tissue (meat) of fish, poultry and slaughter animals]. In *Perspektivnye tekhnologii khraneniya i pererabotki sel'skokhozyaystvennoi produktsii: Nauchnye trudy Severo-Kavkazskogo federal'nogo nauchnogo tsentra sadovodstva, vinogradarstva, vinodeliya* (vol. 20, pp. 88–92). Krasnodar: FGBNU SKFNTsSVV.
- Knyazeva, A. S., Vostrikova, N. L., Ivankin, A. N., & Kulikovskii A. V. (2017). Otsenka biologicheskoi tsennosti myasnogo belka pri khraneni zamorozhennogo myasa [Evaluation of the biological value of meat protein during the storage of frozen meat]. *Vse o myase [All about meat]*, (2), 36–39.
- Kolodyaznaya, V. S., & Baranenko, D. A. (2012). Proteoliticheskaya aktivnost' belkovykh fraktsii myasa pri zamorazhivani i khraneni [Proteolytic activity of meat protein fractions during freezing and storage]. In *Innovatsii v nauke, obrazovanii i biznese — 2012: Trudy X Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii* (vol. 2, pp. 410–413). Kaliningrad: KGTU.
- Krylova, V. B., & Egorov, O. V. (2011). Vliyanie termicheskogo sostoyaniya svininy na azotistye veshchestva konservov «Svinina tushenaya» [Influence of the thermal state of pork on the nitrogenous substances of canned «Pork stew»]. In *Aktual'nye problemy v oblasti sozdaniya innovatsionnykh tekhnologii khraneniya sel'skokhozyaystvennogo syr'ya i pishchevykh produktov: Sbornik materialov Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* (pp. 109–111). Moscow: Rossiiskaya akademiya sel'skokhozyaystvennykh nauk.
- Krylova, V. B., & Gustova, T. V. (2018). K voprosu aromatobrazovaniya myasnykh konservov [On the issue of aroma formation of canned meat]. In *Perspektivnye tekhnologii khraneniya i pererabotki sel'skokhozyaystvennoi produktsii: Nauchnye trudy Severo-Kavkazskogo federal'nogo nauchnogo tsentra sadovodstva, vinogradarstva, vinodeliya* (pp. 153–160). Krasnodar: FGBNU SKFNTsSVV.
- Lisitsyn, A. B., Chernukha, I. M., Vostrikova, N. L., & Gorbunova, N. A. (2013). Izuchenie vliyaniya nizkoterperaturnogo khraneniya na aminokislotnyi sostav myasa [Study of the effect of low-temperature storage on the amino acid composition of meat]. In *Innovatsionnye tekhnologii v proizvodstve i pererabotke sel'skokhozyaystvennoi produktsii v usloviyakh VTO: Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* (pp. 9–12). Volgograd: VGTU.
- Lisitsyn, A. B., Ivankin, A. N., Vostrikova, N. L., & Stanovova, I. A. (2014). Izuchenie fraktsionnogo sostava belkov myasa v protsesse dlitel'nogo kholodil'nogo khraneniya [Study of the fractional composition of meat proteins during long-term cold storage]. *Vse o myase*, (2), 36–40.
- Mileenkova, E. V., Kuznetsova, T. G., & Nasonova, V. V. (2020). Izuchenie vliyaniya zamorazhivaniya na pokazateli kachestva myasnogo syr'ya, poluchennogo ot svininy s razlichnym techeniem avtoliza [Study of the influence of freezing on the quality indicators of meat raw materials obtained from pork with different course of autolysis]. *Vse o myase*, (2), 45–49. <https://doi.org/10.21323/2071-2499-2020-2-45-49>
- Alonso, V., Muela, E., Tenas, J., Calanche, J. B., Roncalés, P., & Beltrán, J. A. (2016). Changes in physicochemical properties and fatty acid composition of pork following long-term frozen storage. *European Food Research and Technology*, 242(12), 2119–2127. <https://doi.org/10.1007/s00217-016-2708-y>
- Bao, Y., & Ertbjerg, P. (2019). Effects of protein oxidation on the texture and water-holding of meat: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 59(22), 3564–3578. <https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1498444>
- Chernukha, I. M., & Akhremko, A. G. (2019). Assessing the effect of thermal treatment on meat proteins using proteomic methods. *Theory and Practice of Meat Processing*, 4(3), 4–6. <https://doi.org/10.21323/2414-438X-2019-4-3-4-6>
- Coombs, C. E. O., Holman, B. W. B., Friend, M. A., & Hopkins, D. L. (2017). Long-term red meat preservation using chilled and frozen storage combinations: A review. *Meat Science*, 125, 84–94. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2016.11.025>
- Estévez, M. (2011). Protein carbonyls in meat systems: A review. *Meat Science*, 89(3), 259–279. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2011.04.025>
- Estévez, M., & Xiong, Y. (2019). Intake of Oxidized Proteins and Amino Acids and Causative Oxidative Stress and Disease: Recent Scientific Evidences and Hypotheses. *Journal of Food Science*, 84(3), 387–396. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.14460>

- Estévez, M., Ollilainen, V., & Heinonen, M. (2009). Analysis of protein oxidation markers alpha-Aminoadipic and gamma-Glutamic semialdehydes in food proteins using liquid chromatography (LC)-Electrospray Ionization (ESI)-Multistage tandem mass spectrometry (MS). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 57(9), 3901–3910. <https://doi.org/10.1021/jf804017p>
- Holman, B. W. B., Coombs, C. E. O., Morris, S., Kerr, M. J., & Hopkins, D. L. (2018). Effect of long term chilled (up to 5 weeks) then frozen (up to 12 months) storage at two different sub-zero holding temperatures on beef: Protein structure degradation and a marker of protein oxidation. *Meat Science*, 139, 171–178. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2018.01.028>
- Jeong, J. Y., Kim, G. D., Yan, H. S., & Joo, S. T. (2011). Effect of freeze-thaw cycles on physicochemical properties and color stability of beef semimembranosus muscle. *Food Research International*, 44(10), 3222–3228. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2011.08.023>
- Kim, H.-W., Kim, J.-H., Seo, J.-K., Setyabrata, D., & Kim, Y. H. B. (2018). Effects of aging/freezing sequence and freezing rate on meat quality and oxidative stability of pork loins. *Meat Science*, 139, 162–170. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2018.01.024>
- Kral, M., Honzirkova, K., Tremlova, B., & Zdarsky, M. (2016). The effect of conventional and shock freezing on drip loss and textural parameters of beef meat. *Theory and Practice Meat Processing*, 1(1), 6–9. <https://doi.org/10.21323/2114-441X-2016-1-06-09>
- Leygonie, C., Britz, T. J., & Hoffman, L. C. (2012). Impact of freezing and thawing on the quality of meat: Review. *Meat Science*, 91(2), 93–98. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2012.01.013>
- Leygonie, C., Britz, T. J., & Hoffman, L. C. (2012). Meat quality comparison between fresh and frozen/thawed ostrich *M. iliofibularis*. *Meat Science*, 91(3), 364–368. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2012.02.020>
- Lund, M., Heinonen, M., Baron, C. P., & Estevez, M. (2011). Protein oxidation in muscle foods: A review. *Molecular Nutrition & Food Research*, 55(1), 83–95. <https://doi.org/10.1002/mnfr.201000453>
- Medića, H., Kušecb, I. D., Pleadinc, J., Kozačinskid, L., Njarid, B., Hengle, B., & Kušec, G. (2018). The impact of frozen storage duration on physical, chemical and microbiological properties of pork. *Meat Science* 140, 119–127. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2018.03.006>
- Qi, J., Li, C., Chen, Y., Gao, F., Xu, X., & Zhou, G. (2012). Changes in meat quality of ovine longissimus dorsi muscle in response to repeated freeze and thaw. *Meat Science*, 92(4), 619–626. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2012.06.009>
- Rahman, M. H., Hossain, M. M., Rahman, S. M. E., Amin, M. R., & Oh, D.-H. (2015). Evaluation of physicochemical deterioration and lipid oxidation of beef muscle affected by freeze-thaw cycle. *Food Science of Animal Resources*, 35(6), 772–782. <https://doi.org/10.5851/kosfa.2015.35.6.772>
- Soladoye, O. P., Juarez, M. L., Aalhus, J. L., Shand, P., & Estevez, M. (2015). Protein oxidation in processed meat: Mechanisms and potential implications on human health. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 14(2), 106–122. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12127>
- Xia, X., Kong, B., Liu, Q., & Liu, J. (2009). Physicochemical change and protein oxidation in porcine longissimus dorsi as influenced by different freeze-thaw cycles. *Meat Science*, 83(2), 239–245. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2009.05.003>
- Xia, X., Zhang, M., Li, F., & Kong, B. (2017). Protein structure changes in porcine longissimus muscle as Influenced by multiple freeze-thaw cycles. In *63rd International Congress of Meat Science and Technology* (pp. 117–118). Cork, Ireland.
- Xiong, Y. I. (2000). Protein oxidation and implications for muscle food quality. In E. Decker, & C. Faustman (Eds.) *Antioxidants in Muscle Foods* (pp. 85–111). UK: John Wiley & Sons.
- Zequan, X., Zirong, W., Jiankun, L., Xin, M., Hopkins, D. L., Holman, B. W. B., & Bekhit, A. E.-D. A. (2019). The effect of freezing time on the quality of normal and pale, soft and exudative (PSE)-like pork. *Meat Science*, 152, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2019.02.003>
- Zhan, X., Sun, D.-W., Zhu, Z., & Wang, Q.-J. (2018). Improving the quality and safety of frozen muscle foods by emerging freezing technologies: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 58(17), 2925–2938. <https://doi.org/10.1080/10408398.2017.1345854>
- Zhang, Y., & Ertbjerg, P. (2018). Effects of frozen-then-chilled storage on proteolytic enzyme activity and water-holding capacity of pork loin. *Meat Science*, 145, 375–382. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2018.07.017>
- Zhang, Y., Puolanne, E., & Ertbjerg, P. (2021). Mimicking myofibrillar protein denaturation in frozen-thawed meat: Effect of pH at high ionic strength. *Food Chemistry*, 338, Article 128017. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128017>