УДК 664.8.037.1

История и перспективы развития холодильной технологии пищевых продуктов

Д-р техн. наук **В. С. КОЛОДЯЗНАЯ**, *канд. техн. наук* **О. Н. РУМЯНЦЕВА**[1],
д-р техн. наук **Е. И. КИПРУШКИНА**
Университет ИТМО
[1]E-mail: rumiantseva@itmo.ru

В статье рассмотрена история развития холодильной технологии пищевых продуктов в России и за рубежом. Отражен вклад российских ученых в научные исследования и развитие холодильной отрасли. Рассмотрен ряд приоритетных научных направлений в холодильных технологиях пищевых продуктов. Приведен анализ современных российских и зарубежных научных исследований в области замораживания, применительно к растительному пищевому сырью. Представлен обзор научных результатов по применению предварительной обработки дегидрозамораживанием, осмотического обезвоживания, микроволновой вакуумной дегидратацией; изохорного замораживания и гидрофлюидизации, хранения и дополнительных к холоду средств, таких как импульсное электрическое поле, использование криопротекторов, акустическое замораживание, применение ультразвука и микроволнового излучения.

Ключевые слова: холодильная технология, предварительная обработка перед замораживанием, замораживание растительного сырья, качество замороженных продуктов.

Информация о статье:
Поступила в редакцию 12.12.2022, одобрена после рецензирования 19.01.2023, принята к печати 27.01.2023
DOI: 10.17586/1606-4313-2023-22-1-47-54
Язык статьи — русский
Для цитирования:
Колодязная В. С., Румянцева О. Н., Кипрушкина Е. И. История и перспективы развития холодильной технологии пищевых продуктов. // Вестник Международной академии холода. 2023. № 1. С. 47–54. DOI: 10.17586/1606-4313-2023-22-1-47-54

The history and the prospects of food refrigeration

D. Sc. **V. S. KOLODYAZHNAYA**, *Ph. D.* **O. N. RUMYANTSEVA**[1], *D. Sc.* **E. I. KIPRUSHKINA**
ITMO University
[1] E-mail: rumiantseva@itmo.ru

The article reviews the history of food refrigeration technology in Russia and abroad. The contribution of Russian scientists to scientific research and development of the refrigeration industry is analyzed. A number of priority scientific directions in refrigeration technology of food products are considered. The analysis of modern Russian and foreign scientific research in the field of freezing as applied to vegetable food raw materials is presented. This paper gives an overview of scientific results on the application of pre-treatment by dehydrofreezing, osmotic dehydration, microwave vacuum dehydration, isochoric freezing, and hydrofluidization, storage and some techniques used in addition to cold treatment such as pulse electric field, the use of cryoprotectors, acoustic freezing, the application of ultrasound and microwave radiation.

Keywords: refrigeration technology, pretreatment before freezing, freezing of vegetable raw materials, quality of frozen foods.

Article info:
Received 12/12/2022, approved after reviewing 19/01/2023, accepted 27/01/2023
DOI: 10.17586/1606-4313-2023-22-1-47-54
Article in Russian
For citation:
Kolodyazhnaya V. S., Rumyantseva O. N., Kiprushkina E. I. The history and the prospects of food refrigeration. *Journal of International Academy of Refrigeration.* 2023. No 1. p. 47–54. DOI: 10.17586/1606-4313-2023-22-1-47-54

Введение

Для обеспечения продовольственной безопасности страны, бесперебойного снабжения населения высококачественными и безопасными продуктами питания важное значение имеет не только увеличение их производства, но и снижение потерь на всех этапах — от производства до реализации. Международный институт холода (International Institute of Refrigeration, Paris) приводит данные, что каждый год в мире до 30 % производимых продовольственных продуктов и сырья теряются. Сохранение качества, пищевой и биологической ценности, увеличение продолжительности хранения скоропортящихся продуктов возможно только с помощью искусственного холода. При этом искусственный холод в настоящее время применяется только для сохранения примерно половины произведенных продуктов [1].

Холодильные технологии приобретают все большее значение в вопросах сохранения продуктов: сохранение качества и пищевой ценности, получение экологически безопасных продуктов питания с длительным сроком годности, снижение потерь массы выращенных продуктов питания, повышение уровней продовольственной безопасности и гигиены, развитие международной торговли [2, 3].

При установившихся уже фундаментальных положениях, составляющих основу холодильной технологии, непрерывно появляются новые исследования, не только дополняющие ранее накопленный комплекс знаний, но и заставляющие критически пересматривать то, что прежде считалось ясным и доказанным. Растущие запросы практики предъявляют новые требования к исследованиям, а исследования указывают новые пути в решении практических задач.

История возникновения и развитие холодильной технологии пищевых продуктов

Принципы сохранения пищевых продуктов с применением холода были впервые сформулированы в 1873 г. Шарлем Телье на примере хранения свежего мяса [4].

В развитии холодильной технологии и техники, как самостоятельных областей знаний, большую роль сыграла необходимость сохранения пищевых продуктов во время длительных перевозок. Впервые транспортировка говядины с использованием искусственного машинного охлаждения была осуществлена в Аргентину из Франции в 1876 г. В 1879 г. в Лондон было доставлено охлажденное мясо из Америки, в 1880 г. — мороженое мясо из Австралии, а в 1882 г. — из Новой Зеландии.

В 1888 г. после постройки Сибирской железной дороги в России были приобретены 50 вагонов-ледников для сохранения качества сливочного масла при транспортировке из Западной Сибири.

С применением искусственного охлаждения открылась возможность международной торговли пищевыми продуктами. В дальнейшем стали перевозить на дальние расстояния и другие продукты (мясное сырье, сыр, фрукты и др.), что послужило основанием для строительства стационарных холодильников в местах получения продуктов. Первые холодильники в России построены в 1877 г. на рыбных промыслах г. Астрахани, Махачкалы, Архангельска и др. Первый промышленный холодильник вместимостью 250 тонн появился в 1895 г. в Белгороде.

Создание парка изотермических вагонов, строительство складов с льдосоляным охлаждением, создание охлаждаемых трюмов пароходов, отмена пошлин для холодильного оборудования в России в конце XIX века привели к началу формирования холодильной отрасли.

В 1901 г. по инициативе председателя Императорского московского общества сельского хозяйства князя А. Г. Щербатова был издан «Сборник по скороспелому мясному скотоводству, промышленному птицеводству и организации экспорта ценных скоропортящихся продуктов», в котором впервые в России публично затрагивались вопросы холодильного дела [5].

Годы Первой русской революции задержали развитие холодильной отрасли в России. В Европе и Америке данная отрасль развивалась интенсивно и в 1908 г. в Париже состоялся I Международный конгресс по холодильному делу.

Началу создания холодильных мощностей в России способствовала организация комитетов, объединяющих русских холодильщиков. Первый холодильный комитет основан в 1908 г. в Петербурге вскоре после 1-го Международного Конгресса по холоду в Париже. Холодильные комитеты были созданы в 12 городах, а в г. Томске — организовано Общество для содействия применению и развитию холода в Сибири.

В 1910 г. в Петербурге вышел в свет первый русский журнал «Известия Комитета по холодильному делу» под редакцией Н. А. Бородина. В 1912 г. Московский комитет по холодильному делу при московском обществе сельского хозяйства начал выпускать ежемесячный журнал «Холодильное дело», предшественника сегодняшнего издания «Холодильная техника».

Первая исследовательская лаборатория по холодильной технологии была создана в 1918 г. в Московском институте народного хозяйства им. Г. В. Плеханова. Ее организатором и научным руководителем стал профессор Ф. С. Касаткин. Эта лаборатория стала первым научным центром, где проводились фундаментальные исследования по быстрому замораживанию мяса и рыбы, производству рыбного филе, фасованного мяса и т. д.

В СССР в 1926 г. впервые в мире пришли к идее использования промышленного холода для производства замороженных фруктов и овощей, и продуктов их переработки. В 1932 г. на Московском молочном комбинате и Холодильнике № 2 были сданы в эксплуатацию первые цеха по промышленному производству мороженого [6, 7].

В связи с явным недостатком инженеров по холодильной технике и технологии 31 мая 1931 г. был создан Ленинградский учебный механико-технологический холодильный комбинат, который с 1934 г. стал называться Ленинградский технологический институт холодильной промышленности. В институте видный ученый-холодильщик Михаил Владимирович Тухшнайд организовал лабораторию, где успешно проводили исследования по влиянию низких температур на изменения качества продуктов при холодильной обработке и хранении. Им было написано первое учебное пособие для студентов под названием «Холодильная технология пищевых продуктов» [4, 8].

Инициатором исследований и внедрения искусственного холода в пищевую промышленность был Николай Алексеевич Головкин — видный ученый, автор более 300 научных работ, доктор технических наук, лауреат Государственной премии СССР (1972 г.) за разработку теории и практики холодильного консервирования пищевых продуктов при близкриоскопических температурах, создатель научной школы холодильной технологии, которую успешно возглавлял с 1946 по 1988 гг. Научными сотрудниками данной школы были предложены новые методы и способы холодильной обработки и хранения с применением низких температур мяса, птицы, рыбы, плодов и овощей и различных полуфабрикатов.

Развитие холодильной технологии пищевых продуктов, как науки, в СССР связано с именами таких известных ученых как Ф. В Церевитинов, Э. И Каухчешвили, Д. Г. Рютов, Г. Б. Чижов, И. Г. Чумак, И. Г. Алямовский, А. С. Гинзбург, И. А. Рогов, К. П. Венгер, Б. Н. Семенов, а за рубежом с именами Р. Планка, Л. Бартлетта, А. Лондона, Р. Хайса, У. Тамма, Л. Риделя, Ф. Леви, А. Гака, Г. Лорентцена.

Разработкой отечественных технических средств холодильной обработки пищевых продуктов занимались В. П. Зайцев, А. Е. Ниточкин, С. М. Мекеницкий, А. П. Шеффер, А. Г. Ионов и др.

В настоящее время вопросами холода на мировом уровне занимается Международный Института холода. В Российской Федерации научным обеспечением процессов холодильной обработки и хранения сельскохозяйственного сырья и пищевых продуктов, помимо профильных вузов, занимаются Всероссийский научно-исследовательский институт холодильной промышленности — филиал ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В. М. Горбатова» РАН, Международная академия холода (МАХ) и др.

Общественная организация «Международная академия холода» была создана в июне 1993 г. с целью объединения ведущих ученых и специалистов в областях холодильной и криогенной техники, техники кондиционирования воздуха, технологий хранения и переработки пищевых продуктов, машин и агрегатов пищевых производств, экологии, экономики, подготовки и переподготовки кадров, менеджмента, финансов и др. В течение 30 лет своего существования МАХ является площадкой для профессионалов и двигателем научного прогресса в холодильной отрасли.

По оценке экспертов, холодильная отрасль будет играть все более важную роль в питании людей, что обусловлено изменением образа жизни и урбанизацией.

В настоящее время доля сегмента замороженных продуктов в структуре продовольственного рынка России составляет 16–17%, в США этот же сегмент занимает 71%.

Российский рынок замороженных пищевых продуктов растет интенсивно, средний темп роста в 2016–2019 гг. составил около 16% в год (рис. 1) [9].

Значительная доля производства замороженного растительного сырья в России приходится на овощи — 86% (рис. 2).

Прогноз развития рынка замороженной продукции в Российской Федерации на 2020–2023 гг. показывает, что даже при пессимистическом сценарии предполагается ежегодный рост среднегодового уровня до 6% [10]. Развитие отрасли требует внедрения новых технологий и оборудования, которые невозможны без научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ.

Исследования в области холодильной технологии пищевых продуктов

Современное развитие и совершенствование процессов и технических средств холодильной технологии должно основываться на комплексе исследований, включающих изучение свойств пищевых продуктов и влияния на них внешних факторов, совершенствование конструкций элементов и процессов с установлением рациональных режимов их работы, определение теплофизических характеристик пищевых продуктов и аналитическое описание закономерностей теплофизических процессов при холодильной обработке и хранении пищевых продуктов.

В центре внимания также стоят вопросы повышения уровня санитарно-гигиенических требований и мониторинга холодильной цепи, энергосбережения, техники безопасности аммиачных и фреоновых холодильных установок, охраны окружающей среды, включая ограничения Монреальского протокола и Парижского соглашения.

Научной школой под руководством Заслуженного работника высшей школы РФ, доктора технических наук, профессора Университета ИТМО В. С. Колодязной в качестве приоритетных научных направлений развития холодильных технологий пищевых продуктов определены следующие:

— исследование и разработка высокоэффективных технологий длительного хранения растительной продукции с применением искусственного холода, газо-селективных мембран и физико-химических средств защиты;

— исследование физиолого-биохимических, биофизических и микробиологических процессов в пищевых продуктах при хранении в охлажденном и замороженном состоянии;

— разработка новых комбинированных быстрозамороженных полуфабрикатов на основе использования нетрадиционного растительного и животного сырья, обладающего лечебными свойствами;

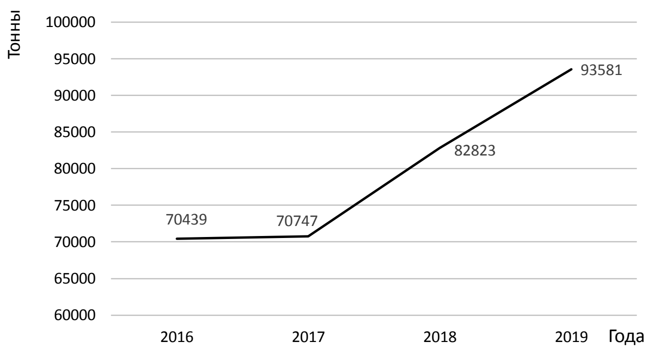

Рис. 1. Производство замороженных овощей, фруктов и ягод в Российской Федерации, 2016–2019 гг.

Fig. 1. The production of frozen vegetables, fruits, and berries in the Russian Federation from 2016 to 2019

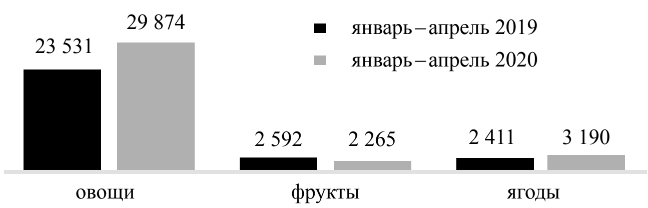

Рис. 2. Структура производства по сегментам в Российской Федерации, тонны в 2019–2020 гг.

Fig. 2. Segmented production structure (vegetables, fruits, and berries) in the Russian Federation (tons, 2019–2020)

— исследования процессов быстрого замораживания пищевых продуктов в жидких не кипящих многокомпонентных средах;

— применение дополнительных к холоду биологических средств защиты и хитинпроизводных препаратов, направленных на снижение потерь пищевой продукции от микробиологической порчи;

— разработка технологий быстрого замораживания известных и нетрадиционных овощных и плодово-ягодных культур и создание новых комбинированных быстрозамороженных продуктов питания заданного состава и целевого назначения, отличающихся высоким содержанием биологически активных веществ и пониженной энергетической ценностью [11].

Рассмотрим современные исследования в области производства замороженных растительных продуктов.

Из растительного сырья возможно изготовление широкого спектра замороженной продукции — полуфабрикаты и готовые блюда — повседневные обеды, блюда праздничной кухни, специальные наборы; различные комбинированные продукты для профилактического, диетического и детского питания, а также для отдельных групп населения.

Замораживание не идеальный способ консервирования растительных продуктов, он имеет как достоинства, так и недостатки.

Достоинства: максимальное сохранение качества, биологической ценности и пищевых веществ замороженных продуктов при хранении; расширение ассортимента и создание запасов продуктов для равномерного снабжения населения и промышленности, снижение сезонности потребления плодов, ягод и овощей; повышение производительности труда при приготовлении пищи на предприятиях общественного питания и в домашних условиях; сглаживание сезонности работ на перерабатывающих предприятиях.

Недостатки: относительно высокая стоимость замораживания, хранения, транспортирования; необратимая денатурация белков, механическое повреждение клетки, рекристаллизация и остаточная ферментативная активность при хранении в замороженном состоянии, разрушение протоплазмы и потеря клеточного сока при размораживании; высокие энергопотребление и углеродный след.

Основными факторами, влияющими на качество замороженных растительных продуктов, являются: химико-технологические характеристики сырья и критерии устойчивости отдельных видов и сортов ягод, плодов и овощей к низкотемпературному воздействию; режимы и технологии предварительной обработки, замораживания, хранения и размораживания.

Анализ современных исследований российских и зарубежных ученых позволил выделить основные тренды в развитии холодильной технологии растительных продуктов:

— исследование реакции растительных тканей на воздействие низких температур с учетом молекулярного строения, особенностей белковых фракций и других соединений, а также применение криозащитных веществ;

— разработка технологий охлаждения, подмораживания, замораживания и хранения новых видов функциональных продуктов;

— разработка технологий частичной дегидратации, быстрого замораживания и хранения растительных продуктов с высоким начальным влагосодержанием;

— исследование процессов тепло- и массопереноса в зависимости от внешних воздействий и свойств пищевых продуктов.

— изучение состояния и поведения воды в клетках и тканях пищевых продуктов при их холодильном консервировании, изучение механизмов влияния различных структурных фракций воды на процессы, протекающие в охлажденных и замороженных продуктах.

— разработка новых методов замораживания с применением ультразвука, изохорное замораживание и т. п.

Растительные продукты в нативном состоянии содержат высокое количество свободной и слабосвязанной влаги, что приводит к снижению эффективности процесса замораживания и хранения.

Российскими и зарубежными учеными проводятся исследования методов предварительная обработки с частичным удалением свободной и слабосвязанной влаги из растительной ткани, что положительно влияет на технологическую и экономическую эффективность дальнейшего замораживания. Для удаления влаги из пищевых продуктов предлагаются методы высокотемпературного нагрева, осмоса, сублимации, инфракрасного и микроволнового излучения.

Так, для ряда продуктов с высокой первоначальной влажностью предложен метод конвективного дегидрозамораживания, приводящий к значительному уменьшению потерь клеточного сока в связи с меньшим повреждением клеток в дегидрозамороженных образцах [12, 13].

Существенные преимущества показывает метод микроволновой вакуумной дегидратации (до 50%), который позволяет сохранить нативную форму продукта и ускорить миграцию влаги к поверхности. Повышение температуры продукта ограничивается точкой кипения воды при пониженном давлении; наличие вакуума уменьшает окислительные реакции и повышает скорость дегидратации [6].

В работе «Влияние предварительной обработки осмотическим обезвоживанием на характеристики замораживания и качество замороженных фруктов и овощей» исследовано Осмотическое обезвоживание (OD) — это процесс замачивания продуктов в водном растворе, содержащем соль или сахар. Проводится исследование, направленное на устранение потерь влаги и изменения текстуры продукта. Так, комбинация предварительной обработки OD с замораживанием, или осмотическим дегидрозамораживанием, является новой технологией, позволяющей сократить процесс замораживания и продлить срок хранения фруктов и овощей [14].

Важнейшим этапом, влияющим на качество готового продукта, является непосредственно процесс замораживания. Современные исследования включают выбор и обоснование способов и режимов замораживания, обеспечивающих оптимальную скорость процесса.

По скорости процесса (см/ч) выделяют следующие виды замораживания медленное — до 0,5; ускоренное — от 0,5 до 3; быстрое — от 3 до 10; сверхбыстрое — от 10 до 100. Установлено, что повышение скорости замораживания приводит к существенному улучшению качества замороженного продукта.

Наиболее распространенным и широко изученным является замораживание пищевых продуктов в воздушной среде. При замораживании естественной конвекцией скорость процесса мала, поэтому более распространено замораживание в интенсивном потоке охлажденного воздуха как с фиксированным положением продукта, так и с псевдоожиженным слоем.

Для сырья мелкого размера применяется интенсивное замораживание во флюидизационных скороморозильных аппаратах с индивидуальным замораживанием единицы продукта. Для низкотемпературной обработки более крупных продуктов используются скороморозильные аппараты с применением динамических дисперсионных сред, таких как гранулированные пищевые (манная крупа, сахар, соль), инертные (полистирол) или охлаждающие (частицы водного льда) слои. Варьирование скорости воздуха позволяет замораживать широкий спектр сырья.

С целью интенсификации процесса замораживания разрабатываются и внедряются методы быстрого и сверхбыстрого замораживания такие как погружной гидрофлюидизационный в жидких хладоносителях и криогенный метод с использованием жидкого азота или диоксида углерода.

При применении криогенных методов сверхвысокие скорости замораживания приводят к возникновению в слоях продукта значительных механических напряжений, что может вызывать разрушение периферийных слоев продукта и образование трещин. Кроме того, существенным ограничивающим фактором может являться высокая стоимость данных методов.

Использование ряда жидких хладоносителей — растворов хлорида натрия, хлорида кальция, этилового спирта, пропиленгликоля, моно- и дисахаридов в различных концентрациях позволяет достичь значительного сокращения продолжительности замораживания за счет более высоких значений коэффициента теплоотдачи [8].

Эффективным методом является замораживание с использованием мелкокристаллических ледяных суспензий (содержащих до 20 % мелкокристаллического льда) и многокомпонентных некипящих сред. При реализации таких способов необходимо ограничивать процесс диффузии компонентов продукта в замораживающие среды. Установлено, что при использовании жидких хладоносителей и ледяных суспензий наиболее эффективно применение метода гидрофлюидизации [6].

В работе [15] предлагается замораживание с помощью магнитного поля. В этом способе магнитное поле создается вокруг замороженного продукта либо с помощью постоянных магнитов, либо с помощью электромагнитов. В этой инновационной технологии ядерные и электронные спины молекул воды выровнены в направлении магнитного поля, что предотвращает слипание и удерживает их в условиях переохлаждения для ускорения скорости замораживания, что приводит к образованию мелких кристаллов льда без разрушения клеточных мембран.

Проводятся исследования по применению ультразвука в качестве дополнительной технологии для улучшения процесса замораживания (FVS) [16]–[18]. Изучается кавитационный эффект ультразвука и влияние применения ультразвука на время замораживания и физико-химические показатели качества замороженных продуктов. По сравнению с обычной технологией замораживания, применение ультразвука при замораживании FVS может сократить время замораживания и улучшить физико-химические качества, включая потерю влаги, цвет, твердость, химический состав (аскорбиновая кислота, общее количество фенолов и антоцианов), а также микроструктуру. Результаты этих исследований показали, что ультразвук является потенциальной технологией для повышения эффективности замораживания и сохранения качества продуктов. Разрабатывается новое оборудование, используемое для генерации ультразвука при замораживании.

В настоящее время приобретает популярность применение изохорного замораживания. Этот метод основан на ключевом факторе, в котором поддержание внутриклеточной осмоляльности предотвращает прохождение градиентов концентрации растворенных веществ через слои продукта. Так показано, что изохорное замораживание шпината способствует продлению сроков хранения, сохранению в нем аскорбиновой кислоты и фенольных соединений [19].

Пристальное внимание ученых [20] при исследовании процессов замораживания растительного сырья привлекают белки-антифризы — это полипептиды, вырабатываемые растениями, животными и микроорганизмами, которые позволяют им выживать при температурах ниже нуля. Эти соединения были впервые обнаружены в 1969 г. Деврисом в крови рыб, обитающих в северных морских районах, и были названы белками-антифризами, потому что они понижали криоскопическую температуру крови рыб ниже точки замерзания морской воды без значительного повышения осмотического давления. В дальнейшем такие белки были выделены из рыб, беспозвоночных, грибов, растений и бактерий.

Белки-антифризы влияют на процесс льдообразования за счет стабилизации кристаллов льда в определенном диапазоне температур, и при хранении продукта в замороженном состоянии приводят к снижению перекристаллизации льда, что останавливает рост крупных кристаллов. В результате сохраняется текстура продукта за счет уменьшения повреждения клеток, а также сводятся к минимуму потери пищевых веществ в связи с уменьшением потерь клеточного сока. Ученые считают, что можно подобрать для конкретного пищевого продукта свой белок-антифриз с соответствующими характеристиками и уровнем активности.

Ведутся исследования в области комплексного применения замораживания, импульсного электрического поля (PEF), использования криопротекторов отдельно или с PEF в процессе вакуумной пропитки (VI) или осмотической дегидратации [21]. Результаты показывают, что обработка PEF за счет электропорации клеточных мембран улучшает кинетику замораживания, при этом сокращение продолжительности замораживания зависит от вида продукта. С другой стороны, после воздействия PEF меняется структура и цвет продукта. Эти негативные аспекты могут быть сведены к минимуму путем использования криопротекторов вовремя VI в сочетании с PEF, что способствует более интенсивному внедрению криопротекторов в клетки. Эти методы обработки продуктов являются многообещающими, поскольку позволяют получить продукт с улучшенной текстурой (близкой к нативной) и сохраненным тургором после размораживания. Уже имеются примеры коммерциализации данных методов для листовых овощей.

Российскими учеными исследуются методы акустического замораживания (AEF), которые рекомендуется применять для растительных продуктов сегмента «премиум» [22].

Активно продолжаются исследования по изучению влияния замораживания на биологическую ценность растительных продуктов [23]–[25]. Особый интерес представляют исследования антиоксидантной активности. Разрушение клеток, происходящее во время замораживания и хранения продуктов в замороженном виде, может привести к высвобождению антиоксидантных соединений и их деградации в результате химических и ферментативных реакций окисления. В этом контексте технологические условия, предварительная обработка и использование криопротекторов могут снизить степень повреждений, вызванных замораживанием, и позволят сохранить антиоксидантную активность растительных продуктов.

Важным направлением исследований является применение численных методов, которые являются эффективными инструментами для моделирования процесса замораживания. Для моделирования процесса замораживания многих растительных продуктов могут быть использованы три типа численных методов: конечно-разностный, конечно-элементный и конечно-объемный анализ. Для достижения высокого качества продукта при численном моделировании необходимо учитывать критические параметры, которые оказывают влияние на микроструктуру. Точность моделей повышается путем включения основных важных параметров, таких как скорость диффузии, образование и рост кристаллов льда, коэффициентов массопередачи и теплопередачи, а также физико-химические свойств продуктов. Возможно, в дальнейшем будет создана численная модель, которая сможет описать не только явления тепло- и массопереноса, но и все условия процесса замораживания, в которой все критические параметры могут быть оптимизированы [26].

В связи с ростом влияния экологических факторов на все виды деятельности человека проводятся исследования по поведению потребителей при обращении с замороженными пищевыми продуктами, оценке жизненного цикла замороженной продукции и т. п. [27]–[29].

Заключение

Применение искусственного холода для сохранения пищевого сырья и продуктов питания является важным аспектом обеспечения продовольственной безопасности государства.

Технический прогресс в области холодильной обработки и хранения пищевых продуктов немыслим без плодотворного развития научных знаний, осуществляемых на основе широких комплексных исследований.

Для получения замороженной растительной продукции высокого качества рекомендуется применять современные методы предварительной обработки –дегидрозамораживание, осмотическое обезвоживание, микроволновую вакуумную дегидратацию; изохорное замораживание и гидрофлюидизацию, а также дополнительные к холоду средства, такие как криопротекторы, импульсное электрическое поле, акустическое замораживание, применение ультразвука и микроволнового излучения.

Анализ зарубежных и российских исследований показал, что в российских научных изданиях существенно снизилось количество публикаций в области холодильных технологий. Во многом, это может быть связано с серьезными реорганизационными процессами в российских университетах и научных организациях, что привело к снижению количества и качества научных исследований в области холодильных технологий пищевых продуктов. При этом количество исследований в зарубежных вузах показывает существенный рост.

Модернизация холодильной отрасли требует развития научно-исследовательской и инновационной деятельности, реконструкции и технического перевооружения научных лабораторий, подготовки высококвалифицированных специалистов, внедрения современных аграрных методов, прогрессивных технологий и оборудования.

Литература

1. Холодильные машины: Учеб. для студентов вузов специальности «Техника и физика низких температур» / А. В. Бараненко, Н. Н. Бухарин, В. И. Пекарев, Л. С. Тимофеевский; Под общ. ред. Л. С. Тимофеевского. СПб.: Политехника, 2006.
2. Доктрина продовольственной безопасности Российской Федерации. М.: Росинформагротех, 2020. 23 с.
3. *Колодязная В. С., Кипрушкина Е. И., Бараненко Д. А., Шестопалова И. А.* Искусственный холод и скрытые резервы пищевых отраслей // Пищевая промышленность. 2018. № 4. С. 42–46.
4. *Головкин Н. А.* Холодильная технология пищевых продуктов. М.: Легкая и пищевая промышленность, 1984. 240 с.
5. *Мещеряков Ф. М.* Основы холодильной техники и холодильной технологии. М.: Пищевая промышленность, 1975, 559 с.

References

1. Refrigerating machines: Studies for university students majoring in «Low temperature Engineering and physics» / A. V. Baranenko, N. N. Bukharin, V. I. Pekarev, L. S. Timofeevsky; Under the general editorship of L. S. Timofeevsky. St. Petersburg: Polytechnic, 2006. (in Russian)
2. The Doctrine of food Security of the Russian Federation. M.: Rosinformagrotech, 2020. 23 p. (in Russian)
3. Kolodyaznaya V. S., Kiprushkina E. I., Baranenko D. A., Shestopalova I. A. Artificial cold and hidden reserves of food industries. *Food industry.* 2018. No. 4. pp. 42–46. (in Russian)
4. Golovkin N. A. Refrigeration technology of food products. Moscow: Light and food industry, 1984. 240 p. (in Russian)
5. Meshcheryakov F. M. Fundamentals of refrigeration and refrigeration technology. Moscow: Food industry, 1975, 559 p. (in Russian)

6. *Колодязная В. С., Румянцева О. Н.* Проблемы и пути развития холодильной технологии пищевых продуктов. // Известия Санкт-Петербургского государственного университета низкотемпературных и пищевых технологий. 2008. № 1. С. 14–19.
7. *Манжесов В. И. и др.* Технология хранения, переработки и стандартизация растениеводческой продукции: учебник для вузов. СПб.: Троицкий мост, 2014. 704 с.
8. *Филиппов В. И. и др.* Технологические основы холодильной технологии пищевых продуктов: учебник для вузов. СПб.: ГИОРД, 2014. 576 с.
9. Анализ рынка замороженных овощей, фруктов и ягод: рост в условиях кризиса может замедлиться. // Агропромышленный портал АгроXXI. 2020. [Электронный ресурс]: https://www.agroxxi.ru/analiz-rynka-selskohozjaistvennyh-tovarov/analiz-rynka-zamorozhennyh-ovoschei-fruktov-i-jagod-rost-v-uslovijah-krizisa-mozhet-zamedlitsja. html
10. Анализ рынка замороженных полуфабрикатов в России 2019, прогноз до 2022 года. // MegaResearch. 2020. 78 с. [Электронный ресурс]: https://www.megaresearch.ru/issledovaniya/prodovolstvie-pischevaya-promyshlennost/polufabrikaty/31188
11. *Колодязная В. С., Кипрушкина Е. И., Бараненко Д. А. и др.* Продовольственная безопасность и холодильная технология. //Вестник Международной академии холода. 2013. № 1. С. 24–28.
12. *Schudel S., Prawiranto K., Defraeye T.* Comparison of freezing and convective dehydrofreezing of vegetables for reducing cell damage. // Journal of Food Engineering. 2021. 293,110376.
13. *Hajji W., Gliguem H., Bellagha S., Allaf K.* Impact of initial moisture content levels, freezing rate and instant controlled pressure drop treatment (DIC) on dehydrofreezing process and quality attributes of quince fruits. // Drying Technology. 2019. 37 (8). p. 1028–1043.
14. *Alabi K. P., Olalusi A. P., Olaniyan A. M., Fadeyibi A., Gabriel L. O.* Effects of osmotic dehydration pretreatment on freezing characteristics and quality of frozen fruits and vegetables. // Journal of Food Process Engineering. 2022. 45 (8). e14037.
15. *Kaur M., Kumar M.* An Innovation in Magnetic Field Assisted Freezing of Perishable Fruits and Vegetables: A Review. // Food Reviews International. 2019.
16. *Wu J., Jia X., Fan K.* Recent advances in the improvement of freezing time and physicochemical quality of frozen fruits and vegetables by ultrasound application. // International Journal of Food Science and Technology. 2022. 57 (6). p. 3352–3360.
17. *Das K., Zhang M., Bhandari B. ets.* Ultrasound generation and ultrasonic application on fresh food freezing: Effects on freezing parameters, physicochemical properties and final quality of frozen foods. // Food Reviews International. 2022.
18. *Zhang P., Zhu Z., Sun D.-W.* Using power ultrasound to accelerate food freezing processes: Effects on freezing efficiency and food microstructure. // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2018. 58 (16). p. 2842–2853.
19. *Thakur S., Jha B., Bhardwaj N., Sawale P. D., Kumar A.* Isochoric freezing of foods: A review of instrumentation, mechanism, physicochemical influence, and applications. // Journal of Food Processing and Preservation. 2022.
20. *Ustun N. S., Turhan S.* Antifreeze proteins in foods: In book: Antifreeze Proteins Volume 2. 2020. pp. 231–260.
21. *Dadan M., Nowacka M., Czyzewski J., Witrowa-Rajchert D.* Modification of food structure and improvement of freezing

6. Kolodyaznaya V. S., Rumyantseva O. N. Problems and ways of development of refrigeration technology of food products. *Proceedings of the St. Petersburg State University of Low-Temperature and Food Technologies*. 2008. No. 1. pp. 14–19. (in Russian)
7. Manzhesov V. I. et al. Technology of storage, processing and standardization of crop production: textbook for universities. St. Petersburg: Troitsky Bridge, 2014. 704 p. (in Russian)
8. Filippov V. I. et al. Technological fundamentals of refrigeration technology of food products: textbook for universities. St. Petersburg.: GIORD, 2014. 576 p. (in Russian)
9. Analysis of the market of frozen vegetables, fruits and berries: growth in a crisis may slow down. Agroindustrial portal AgroXXI. 2020. [Electronic resource]: https://www.agroxxi.ru/analiz-rynka-selskohozjaistvennyh-tovarov/analiz-rynka-zamorozhennyh-ovoschei-fruktov-i-jagod-rost-v-uslovijah-krizisa-mozhet-zamedlitsja. html (in Russian)
10. Analysis of the frozen semi-finished products market in Russia 2019, forecast until 2022. MegaResearch. 2020. 78 p. [Electronic resource]: https://www.megaresearch.ru/issledovaniya/prodovolstvie-pischevaya-promyshlennost/polufabrikaty/31188 (in Russian)
11. Kolodyaznaya V. S., Kiprushkina E. I., Baranenko D. A. et al. Food safety and refrigeration technology. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2013. No. 1. pp. 24–28. (in Russian)
12. Schudel S., Prawiranto K., Defraeye T. Comparison of freezing and convective dehydrofreezing of vegetables for reducing cell damage. *Journal of Food Engineering*. 2021. 293,110376.
13. Hajji W., Gliguem H., Bellagha S., Allaf K. Impact of initial moisture content levels, freezing rate and instant controlled pressure drop treatment (DIC) on dehydrofreezing process and quality attributes of quince fruits. *Drying Technology*. 2019. 37 (8). p. 1028–1043.
14. Alabi K. P., Olalusi A. P., Olaniyan A. M., Fadeyibi A., Gabriel L. O. Effects of osmotic dehydration pretreatment on freezing characteristics and quality of frozen fruits and vegetables. *Journal of Food Process Engineering*. 2022. 45 (8). e14037.
15. Kaur M., Kumar M. An Innovation in Magnetic Field Assisted Freezing of Perishable Fruits and Vegetables: A Review. *Food Reviews International*. 2019.
16. Wu J., Jia X., Fan K. Recent advances in the improvement of freezing time and physicochemical quality of frozen fruits and vegetables by ultrasound application. *International Journal of Food Science and Technology*. 2022. 57 (6). p. 3352–3360.
17. Das K., Zhang M., Bhandari B. ets. Ultrasound generation and ultrasonic application on fresh food freezing: Effects on freezing parameters, physicochemical properties and final quality of frozen foods. *Food Reviews International*. 2022.
18. Zhang P., Zhu Z., Sun D.-W. Using power ultrasound to accelerate food freezing processes: Effects on freezing efficiency and food microstructure. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2018. 58 (16). p. 2842–2853.
19. Thakur S., Jha B., Bhardwaj N., Sawale P. D., Kumar A. Isochoric freezing of foods: A review of instrumentation, mechanism, physicochemical influence, and applications. *Journal of Food Processing and Preservation*. 2022.
20. Ustun N. S., Turhan S. Antifreeze proteins in foods: In book: Antifreeze Proteins Volume 2. 2020. pp. 231–260.
21. Dadan M., Nowacka M., Czyzewski J., Witrowa-Rajchert D. Modification of food structure and improvement of freezing

processes by pulsed electric field treatment: In book: Pulsed Electric Fields to Obtain Healthier and Sustainable Food for Tomorrow. 2020. p. 203–226.

22. *Климашевский И. В., Балаболин Д. Н., Печурин А. А. и др.* Разработка методики оценки органолептической ценности фруктов, ягод и овощей, замороженных в условиях акустической заморозки. // Плодоводство и виноградарство Юга России. 2022. № 74 (2). С. 204–221. DOI: 10.30679/2219-5335-2022-2-74-204-221.
23. *Neri L., Faieta M., Di Mattia C., Mastrocola D., Pittia P.* Antioxidant activity in frozen plant foods: Effect of cryoprotectants, freezing process and frozen storage. // Foods. 2020. 9 (12):1886.
24. *Колодязная В. С., Кипрушкина Е. И., Румянцева О. Н., Миронова Д. Ю.* Изменение содержания фенольных соединений в полуфабрикатах из цикория салатного Эндивий в процессе низкотемпературной обработки. // Холодильная техника. 2022. № 1. С. 29–36.
25. *Кравченко Д. А., Румянцева О. Н., Колодязная В. С.* Влияние условий холодильной обработки на качество яблок осенних сортов. // Вестник Международной академии холода. 2016. № 2. С. 15–20.
26. *Rindang A., Suro Mardjan S., Darmawati E., Hartulistiyoso E.* Numerical methods and its application in freezing process. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022. 1038 (1):012077.
27. *Kölzer B. S., Geppert J., Klingshirn A., ets.* Consumers impact on food quality under frozen conditions in Germany. // British Food Journal. 2020. 122 (1). p. 36–47.
28. *Connell P. M., Finkelstein S. R., Scott M. L., Vallen B.* Negative associations of frozen compared with fresh vegetables. // Appetite. 2018. Vol. 127. p. 296–302.
29. *James Chapa, Maria Belen Salazar Tijerino, Sierra Kipp, Hua Cai.* A comparative life cycle assessment of fresh imported and frozen domestic organic blueberries consumed in Indiana. // Journal of Cleaner Production. 2019. Vol. 217 (1). p. 716–723.

processes by pulsed electric field treatment: In book: Pulsed Electric Fields to Obtain Healthier and Sustainable Food for Tomorrow. 2020. p. 203–226.

22. Klimashevsky I. V., Balabolin D. N., Pechurin A. A., etc. Development of a methodology for assessing the organoleptic value of fruits, berries and vegetables frozen under acoustic freezing conditions. *Fruit growing and viticulture in the South of Russia.* 2022. No. 74 (2). pp. 204–221. DOI: 10.30679/2219-5335-2022-2-74-204-221. (in Russian)
23. Neri L., Faieta M., Di Mattia C., Mastrocola D., Pittia P. Antioxidant activity in frozen plant foods: Effect of cryoprotectants, freezing process and frozen storage. *Foods.* 2020. 9 (12):1886.
24. Kolodyaznaya V. S., Kiprushkina E. I., Rumyantseva O. N., Mironova D. Yu. Changes in the content of phenolic compounds in semi-finished products from chicory salad endive during low-temperature processing. *Refrigeration equipment.* 2022. No. 1. pp. 29–36. (in Russian)
25. Kravchenko D. A., Rumyantseva O. N., Kolodyaznaya V. S. The influence of refrigeration conditions on the quality of apples of autumn varieties. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2016. No. 2. pp. 15–20. (in Russian)
26. Rindang A., Suro Mardjan S., Darmawati E., Hartulistiyoso E. Numerical methods and its application in freezing process. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022. 1038 (1):012077.
27. Kölzer B. S., Geppert J., Klingshirn A., ets. Consumers impact on food quality under frozen conditions in Germany. *British Food Journal.* 2020. 122 (1). p. 36–47.
28. Connell P. M., Finkelstein S. R., Scott M. L., Vallen B. Negative associations of frozen compared with fresh vegetables. *Appetite.* 2018. Vol. 127. p. 296–302.
29. James Chapa, Maria Belen Salazar Tijerino, Sierra Kipp, Hua Cai. A comparative life cycle assessment of fresh imported and frozen domestic organic blueberries consumed in Indiana. *Journal of Cleaner Production.* 2019. Vol. 217 (1), p. 716–723.

Сведения об авторах

Колодязная Валентина Степановна
Д. т. н., профессор, профессор факультета биотехнологий Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, vskolodiaznaia@itmo.ru

Румянцева Ольга Николаевна
К. т. н., доцент, заместитель директора образовательного центра «Энергоэффективные инженерные системы» Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, rumiantseva@itmo.ru

Кипрушкина Елена Ивановна
Д. т. н., доцент, доцент факультета биотехнологий Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, eikiprushkina@itmo.ru

Information about authors

Kolodyaznaya Valentina S.
D. Sc., Professor, Professor of *Biotechnologies* of ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, vskolodiaznaia@itmo.ru

Rumyantseva Olga N.
Ph. D., Associate Professor, Deputy Director of the Educational center «Energy Efficient engineering Systems» of ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, rumiantseva@itmo.ru

Kiprushkina Elena I.
D. Sc., Associate Professor, Associate Professor of *Biotechnologies* of ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, eikiprushkina@itmo.ru