

УДК 637.5.037, 641.546.45, 664.8.037.5

## Быстрое замораживание продукции животного происхождения с применением оборудования и технологий криогенного метода

Канд. техн. наук **О. А. ФЕСЬКОВ**<sup>1</sup>, канд. техн. наук **В. А. СТЕФАНОВА**,  
канд. техн. наук **И. А. КУЗЬМИНА**

Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ)

<sup>1</sup>E-mail: Feskov76@mail.ru

*Представлен анализ основных факторов расширения отрасли производства быстрозамороженных пищевых продуктов в России, включая перечень основных методов быстрого замораживания, используемых во всем мире. Представлена классификация процесса замораживания, регламентируемая Международным институтом холода (МИХ) в соответствии с уровнями средней скорости замораживания (кристаллизации). Рассмотрена физическая модель процесса быстрого замораживания, согласно которой обосновано понятие истинного «шока» при замораживании в противовес не официальному термину «шоковая заморозка». Обоснована перспективность использования для быстрого замораживания пищевых продуктов криогенного метода на базе жидкого азота, рассмотрены его преимущества и основной недостаток, связанный с высоким расходом и затратами на криоагент, представлены пути снижения его значимости. Получены, на примере обработки сырья из мяса бройлеров, баранины и конины, результаты опытного определения основных параметров процесса быстрого криогенного и комбинированного (азот — воздух) замораживания, представленные графическими данными в виде термограмм, кривых изменения плотности теплового потока и коэффициентов теплоотдачи. Представлено описание экспериментального стенда, на базе азотной мини камеры, позволившего создать рациональные условия быстрого криогенного замораживания мясного сырья, подтвержденные полученными значениями скорости замораживания (кристаллизации). Представлены результаты совместных исследований показателей пищевой и биологической ценности мясного сырья, замороженного для сравнения традиционным воздушным, комбинированным (азот — воздух) и криогенным способами, доказывающие преимущества последнего, включая оценку структуры образования кристаллов льда в исследуемых образцах и уровень сохранности влаги при размораживании, спустя 6 мес хранения. Разработан эскизный проект установки комбинированного (азот — воздух) замораживания тушек бройлеров, состоящей из двух корпусов — азотного и воздушного конвейерных аппаратов. Разработана конструкция принципиально новой модели азотного туннельного скороморозильного аппарата с оптимизированной геометрией теплоизолированного корпуса, обеспечивающего рациональные условия быстрого криогенного замораживания при пониженном энергопотреблении.*

**Ключевые слова:** быстрое замораживание, криогенный метод, жидкий азот, мясное сырье, скорость кристаллизации, скороморозильный аппарат.

### Информация о статье:

Поступила в редакцию 01.10.2023, одобрена после рецензирования 26.12.2023, принята к печати 10.01.2024

DOI: 10.17586/1606-4313-2024-23-1-60-70

Язык статьи — русский

### Для цитирования:

Феськов О. А., Стефанова В. А., Кузьмина И. А. Быстрое замораживание продукции животного происхождения с применением оборудования и технологий криогенного метода // Вестник Международной академии холода. 2024. № 1. С. 60–70. DOI: 10.17586/1606-4313-2024-23-1-60-70

## Quick-freezing of raw-materials of animal origin using cryogenic technologies

Ph. D. **O. A. FESKOV**<sup>1</sup>, Ph. D. **V. A. STEFANOVA**, Ph. D. **I. A. KUZMINA**

Russian Biotechnology University (ROSBIOTECH)

<sup>1</sup>E-mail: Feskov76@mail.ru

*An analysis of the main factors for the expansion of the industry for the production of quick-frozen food products in Russia is presented, including a list of the main methods of quick freezing used all over the world. The classification of the freezing process, regulated by the International Institute of Refrigeration (IIR) in accordance with the levels of the average freezing rate (crystallization), is presented. The physical model of the fast freezing process is considered, according to which the concept of true «shock» during freezing is justified as opposed to the non-official term «shock freezing». The prospects of using a cryogenic method based on liquid nitrogen for rapid freezing of food products are justified, its advantages and the main*

*drawback associated with high consumption and costs of a cryoagent are considered; ways of reducing its significance are presented. The results of experimental determination of the main parameters of the fast cryogenic and combined (nitrogen-air) freezing process, represented by graphic data in the form of thermograms, heat flux density change curves, and heat transfer coefficients, were obtained using the example of processing raw materials from broiler, lamb, and horse meat. A description of the experimental stand is presented, based on a nitrogen mini-chamber, which allowed to create rational conditions for rapid cryogenic freezing of meat raw materials, confirmed by the obtained values of the freezing rate (crystallization). The results of joint studies of indicators of nutritional and biological value of meat raw materials frozen for comparison by traditional air, combined (nitrogen-air), and cryogenic methods are presented, proving the advantages of the latter, including an assessment of the structure of ice crystal formation in the test samples and the level of moisture preservation during thawing, after six months of storage. A draft design has been developed for the unit of combined (nitrogen-air) freezing of broiler carcasses, consisting of two parts — nitrogen and air conveyor apparatuses. The design of a fundamentally new model of a nitrogen tunnel rapid freezing apparatus with optimized geometry of a heat-insulated housing, which provides rational conditions for fast cryogenic freezing with reduced energy consumption, has been developed.*

**Keywords:** quick freezing, cryogenic method, liquid nitrogen, raw meat, crystallization rate, quick freezer.

#### Article info:

Received 01/10/2023, approved after reviewing 26/12/2023, accepted 10/01/2024

DOI: 10.17586/1606-4313-2024-23-1-60-70

Article in Russian

#### For citation:

Feskov O. A., Stefanova V. A., Kuzmina I. A. Quick-freezing of raw-materials of animal origin using cryogenic technologies. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2024. No 1. p. 60–70. DOI: 10.17586/1606-4313-2024-23-1-60-70

### Введение

В последние два десятилетия отрасль производства быстрозамороженных пищевых продуктов в России существенно изменилась. Во-первых, произошло увеличение объемов производства продукции, подвергаемой такому виду консервирования как «быстрое замораживание», обеспечивающее их сохранность и доступность в течение длительного времени, за счет открытия целого ряда предприятий, вытеснивших с российского рынка зарубежный импорт быстрозамороженной продукции. Во-вторых, существенно расширился ассортимент такой продукции, за счет вариативных решений многокомпонентных продуктов и готовых блюд и за счет создания новых продуктов, требующих холодильной обработки, в частности, это коснулось целого ряда молочных продуктов. Особенно следует выделить такие продукты, как мороженое на основе йогуртов, различные молочные, творожные и кремовые десерты, разновидности декоративного льда, для которых быстрое замораживание является не просто операцией холодильной обработки, а самым главным производящим процессом [1, 2].

Для создания условий быстрого замораживания в мировой практике применяют воздушный и криогенный методы, метод погружения в не кипящие жидкости, контактный через металлическую поверхность. Появляются новые способы, например, разработанный в Японии метод замораживания при температурах воздуха на уровне  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ , с применением электромагнитного поля (CAS технология), новый отечественный вариант замораживания в воздухе с наложением акустических волн (AEF технология), проводятся разработки в области применения лазеров для получения искусственного холода [3]–[5].

В России для массового производства традиционно применяют воздушный метод, когда замораживание осуществляется либо в холодильных камерах при температурах воздуха  $-30\text{...}-35\text{ }^{\circ}\text{C}$  и скорости циркуляции

на уровне  $3 \div 5\text{ м/с}$ , либо в условиях пониженной температуры до  $-40\text{...}-60\text{ }^{\circ}\text{C}$  и скоростях  $10 \div 12\text{ м/с}$ , в, так называемых, аппаратах и камерах «шоковой заморозки». В различных литературных источниках и интернет-ресурсах, посвященных технологии и оборудованию «шоковой заморозки» приводится целый спектр преимуществ данного способа, направленных на повышение потребительской привлекательности продукции, замороженной в таких «шокерах». Однако, фактически нигде не приводятся данные по оценке процесса кристаллообразования в продукте, подвергнутому «шоковой заморозке», что является одним из основополагающих факторов, гарантирующих сохранение показателей пищевой ценности продукта после такого замораживания и в течение длительных периодов хранения.

Необходимо пояснить, что процесс замораживания официально регламентируется Международным институтом холода (МИХ) и Комитетом FAO/WHO, а его определение отражено в специализированном словаре «New International Dictionary of Refrigeration» (пер. с англ. — Новый международный словарь по холодильной технике) [6].

Согласно данным МИХ введены официальные термины для классификации процесса замораживания по величине средней  $\omega_{\text{ср}}$  или линейной  $\omega_{\text{л}}$  скорости продвижения фронта кристаллизации в продукте [3]:

- скорости до  $0,5\text{ см/ч}$  соответствуют понятию «медленное замораживание»;
- скорости от  $0,5$  до  $5\text{ см/ч}$  соответствуют понятию «быстрое замораживание»;
- скорости от  $5$  до  $10\text{ см/ч}$  соответствуют понятию «сверхбыстрое замораживание»;
- скорости от  $10$  до  $100\text{ см/ч}$  соответствуют понятию «ультрабыстрое замораживание».

В представленной классификации отсутствует понятие «шоковая заморозка». Возникает вопрос — что же оно означает и чем объяснить его появление?

Начиная с 90-х годов и фактически по настоящее время в нашей стране отсутствовало производство холодильного оборудования, оно поступало из других стран. Одна из разновидностей зарубежных напольных воздухоохладителей с высокоскоростными вентиляторами, применяемых в аппаратах интенсивного замораживания, поступала в Россию под названием «Shock froster». Специалисты отечественных компаний в сфере холодильной техники сначала использовали термин без перевода (транслит) — «шокфростер», а затем перешли на сленговое понятие «шоковая заморозка».

Но необходимо отметить, что в обратном переводе «шоковая заморозка» это «Shock freezing», и такое понятие в словаре NIDR отсутствует.

Правильный перевод должен быть ближе к понятию «быстрое (ударное) замораживание», а воздухоохладитель типа «Shock froster» — «скороморозильный», т. е. предназначенный для скороморозильных камер и аппаратов. Причем, «удар» или «шок» подразумевает не подвод большого количества холода к продукту, а именно максимальный удельный тепловой поток  $q_F$  от продукта на начальном этапе процесса замораживания, т. е. на стадии его охлаждения до достижения значений криоскопической температуры  $t_{кр}$  на поверхности.

Главным параметром для оценки создаваемых условий замораживания и применяемого способа следует считать скорость замораживания или скорость кристаллизации содержащейся в продукте влаги.

Решением задачи оптимизации, на основе результатов многолетних исследований, установлена тесная связь и степень влияния скорости кристаллизации на суммарный общий показатель качества (К) замороженных продуктов, включающего в себя степень обратимости продукта на этапе размораживания после длительного хранения (рис. 1) [3].

Согласно графику, показанному на рис. 1, максимальные значения показателя качества К достигаются установлением оптимальных значений скорости кристаллизации на уровне  $7 \div 9 \cdot 10^{-6}$  м/с, что характерно для диапазона «быстрого замораживания» (эквивалент от 1,38 до  $13,8 \cdot 10^{-6}$  м/с).

Создание практических условий для организации такого скоростного режима возможно за счет применения одного из вышеперечисленных методов быстрого замораживания, широко используемых в мировой и отечественной пищевой индустрии.

На кафедре инженерии процессов, аппаратов холодильной техники и технологий Российского биотехнологического университета (РОСБИОТЕХ) (в прошлом кафедре холодильной техники и технологии МГУ приклад-

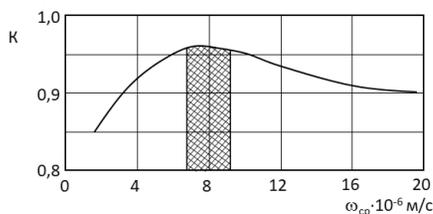


Рис. 1. Зависимость общего показателя качества  $K$  от скорости кристаллизации  $\omega_{кр}$

Fig. 1. Dependency of general quality index  $K$  on crystallization rate  $\omega_{кр}$

ной биотехнологии), более 50 лет выпускающей высококвалифицированных специалистов для холодильной отрасли, создана, под руководством профессора Венгер К. П., целая научная школа в области создания техники и технологий быстрого замораживания пищевых продуктов, а также многофункциональных технологий применения криогенных проточных систем холодоснабжения на базе жидкого азота в различных областях жизнедеятельности.

Криогенный метод замораживания подразумевает более низкий, по сравнению с воздушным, интервал рабочих температур, фактически до  $-200$  °С, что позволяет именно на начальной стадии процесса сформировать защитный слой мелкодисперсных кристаллов льда на поверхности продукта, препятствующий излишнему испарению влаги и преждевременному преодолению его термического сопротивления, исключая, тем самым, его растрескивание [3, 7].

Под руководством Венгер К. П. была разработана и внедрена на производстве, практически единственная отечественная конструкция азотного туннельного скороморозильного аппарата серии АСТА (рис. 2), использующая трехзонный принцип организации процесса замораживания и проточную схему системы холодоснабжения [3, 8].

Конструкция аппарата реализована в виде трех функциональных зон, длина которых тождественна продолжительности каждой из стадий процесса:

- зона предварительного охлаждения парами азота — стадия охлаждения продукта от начальной температуры  $t_n$  до криоскопической на поверхности  $t_{кр}$ ;
- зона орошения жидким азотом — стадия кристаллизации, с изменением температуры продукта от криоскопической на поверхности до криоскопической в центре;
- зона выравнивания температуры в продукте парами азота — стадия понижения температуры заморо-



Рис. 2. Общий вид аппарата АСТА, конвейерной ленты и коллектора с форсунками

Fig. 2. ASTA apparatus, conveyer belt and collector with nozzles

женного продукта до конечной среднеобъемной температуры  $t_v = -18\text{ }^\circ\text{C}$  или заданной температуры центра  $t_{ц}$ .

Самый серьезный недостаток данного метода замораживания заключается в том, что применение низкотемпературных криовеществ ( $\text{CO}_2, \text{N}_2$ ), возможно только по схеме проточного холодоснабжения с одноразовым их использованием, а затраты на их получение увеличивают конечную себестоимость готового продукта.

За годы исследований были разработаны различные схемные решения проточных систем холодоснабжения для повышения степени использования температурного потенциала азота, позволяющие сократить его расход и повысить КПД, способы регенерации температурного потенциала азота за счет его частичного ожижения в вихревой трубе, а также варианты снижения затрат на приобретение азота за счет открытия собственного его производства на том же предприятии.

Важно отметить, что наиболее эффективно применение криогенного метода для продукции с характерной высокой стоимостью, когда доля затрат на азот в конечной розничной цене продукта не значительна, или

для продукции, требующей деликатного замораживания с сохранением структуры продукта.

Так, например, в 2019–2020 гг. были выполнены исследования по определению параметров замораживания тушек бройлеров криогенным (азот) и комбинированным (азот — воздух) способами [9]–[11].

**Результаты исследования и их обсуждение**

Стенды в виде теплоизолированного короба с проточным азотным холодоснабжением и промышленной воздушной холодильной камеры с трехкомпрессорным агрегатом, функционирующим на фреоне R404a, предназначенные для проведения исследования, представлены на рис. 3.

В ходе экспериментальных исследований были получены термограммы процесса  $t=f(\tau)$ , отражающие изменение температур в центре  $t_{ц}$  и на поверхности продукта  $t_{пов}$ , среднеобъемной  $t_v$  и охлаждающей среды  $t_{ср}$ ,  $t_{аз}$  — азота,  $t_{в}$  — воздуха, изменение плотности теплового потока  $q=f(\tau)$  и интенсивности теплоотдачи  $\alpha=f(\tau)$ , представленные на рис. 4, 5.



а

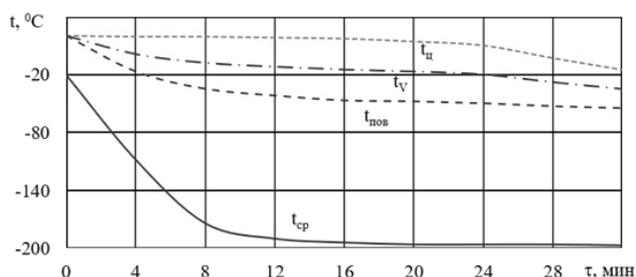


б

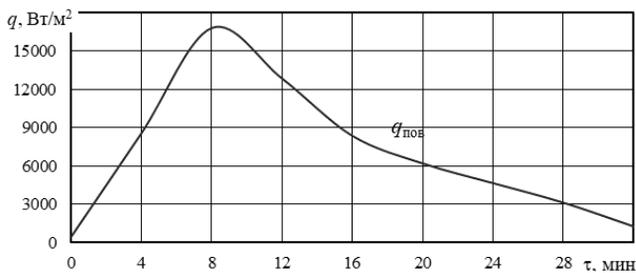
Рис. 3. Общий вид стендов:

а — теплоизолированный азотный короб и сосуды Дьюара; б — воздушная холодильная камера и трехкомпрессорный фреоновый агрегат

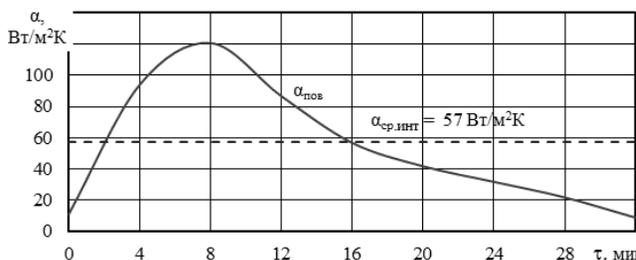
Fig. 3. The stands: а — thermally-insulated nitrogen box and Dewar vessels; б — air refrigerating chamber and three-compressor Freon aggregate



а



б



в

Рис. 4. Параметры криогенного замораживания тушек бройлеров: а — термограмма  $t=f(\tau)$ ;

б — изменение плотности теплового потока  $q=f(\tau)$ ;

в — изменение коэффициента теплоотдачи  $\alpha=f(\tau)$

Fig. 4. Parameters of cryogenic freezing of broilers: а — thermogramm  $t=f(\tau)$ ; б — the changes of heat flux density  $q=f(\tau)$ ; в — the changes of heat transfer coefficient  $\alpha=f(\tau)$

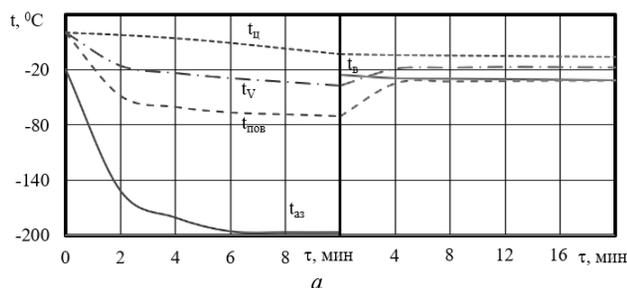


Рис. 5. Параметры комбинированного (азот — воздух) замораживания тушек бройлеров: а — термограмма  $t=f(\tau)$ ; б — изменение плотности теплового потока  $q=f(\tau)$ ; в — изменение коэффициента теплоотдачи  $\alpha=f(\tau)$

Fig. 5. Parameters of combined (nitrogen-air) freezing of broilers: а — thermogram  $t=f(\tau)$ ; б — changes of heat flux density  $q=f(\tau)$ ; в — the changes of heat transfer coefficient  $\alpha=f(\tau)$

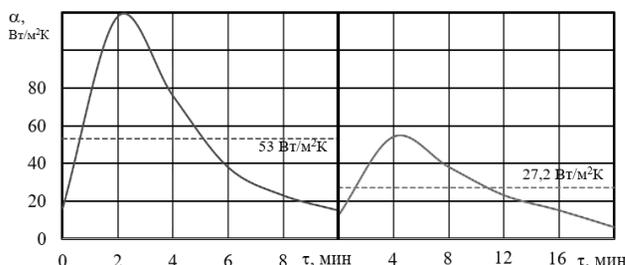
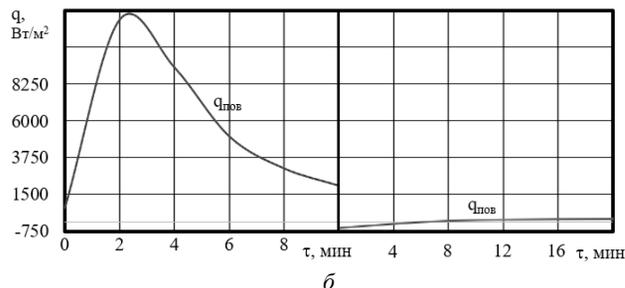
Первое, на что стоит обратить внимание, это пиковые значения удельного теплового потока  $q$  на начальной стадии замораживания. Именно этот факт соотносится с понятием «шок», период которого начинается не сразу при размещении продукта в скороморозильной камере и контакте с большим количеством холода, а спустя некоторое время, когда осуществляется, в соответствии с физическими законами теории теплопроводности, максимальное отведение тепловой нагрузки на этапе охлаждения продукта от начальной температуры  $t_n$  до криоскопической на поверхности  $t_{кр}$ .

В первом случае, при полностью криогенном замораживании тушек бройлеров от начальной температуры  $t_n=20^\circ\text{C}$  до конечной среднеобъемной  $t_v=-18^\circ\text{C}$  продолжительность процесса составила  $\tau=23$  мин, а средняя скорость замораживания (кристаллизации)  $\omega_{ср} = 13,4 \cdot 10^{-6}$  м/с, что соответствует уровню «быстрого замораживания».

В целях сокращения затрат на жидкий азот, но с учетом сохранения требуемых скоростей кристаллизации, во втором случае исследованы параметры процесса при комбинированном способе замораживания, когда на начальной стадии тушки бройлеров замораживали в азотной среде до достижения криоскопической температуры в центре  $t_{кр}=t_n=-3^\circ\text{C}$ , а затем обеспечивали дальнейшее понижение до конечной  $t_v=-18^\circ\text{C}$  и ее выравнивание по всему объему продукта в традиционной воздушной  $t_b=-30^\circ\text{C}$ . Период такого выравнивания температуры продемонстрирован на полученной термограмме показан на рис. 5, а.

При комбинированном (азот — воздух) замораживании продолжительность процесса составила  $\tau=25,5$  мин, а средняя скорость замораживания (кристаллизации)  $\omega_{ср} = 14,4 \cdot 10^{-6}$  м/с, что соответствует пограничному уровню между «быстрым» и «сверхбыстрым» замораживанием.

Полученные методом графического интегрирования среднеинтегральные значения коэффициентов теплоотдачи, для азотной среды  $\alpha_{ср, инт} = 53 \div 57$  Вт/( $\text{м}^2 \cdot \text{K}$ ) и  $\alpha_{ср, инт} = 27,2$  Вт/( $\text{м}^2 \cdot \text{K}$ ) для воздушной, полностью соот-



6

ветствуют создаваемым условиям конвективного теплообмена [10].

Для практической реализации комбинированного (азот — воздух) способа замораживания штучной продукции широкого ассортимента, в рамках проводимых на кафедре исследований, была разработана конструкция двухкорпусной скороморозильной установки, эскизный проект которой показан на рис. 6.

Установка комбинированного замораживания тушек бройлеров рассчитана на производительность 300 кг/ч и включает в себя корпуса азотного и воздушного конвейерных аппаратов. Разработанная конструкция может быть применена для комбинированного замораживания и других видов штучной продукции, при этом производительность установки возможно корректировать путем

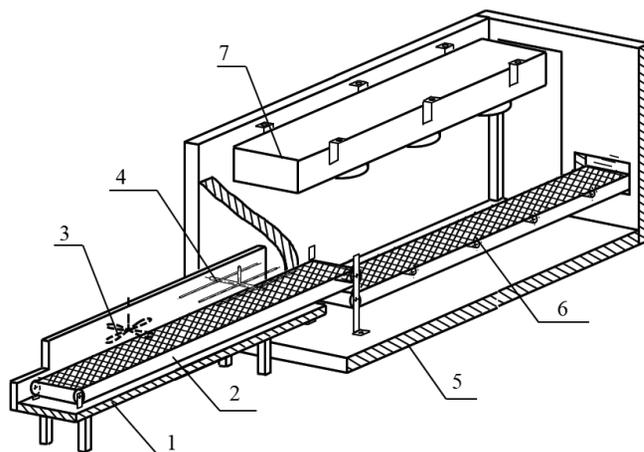


Рис. 6. Эскизный проект двухкорпусной скороморозильной установки: 1 — корпус азотного замораживания; 2, 6 — конвейеры; 3 — вентилятор; 4 — коллектор с форсунками; 5 — корпус воздушного замораживания и выравнивания температуры; 7 — воздухоохладитель

Fig. 6. A draft project for the combined unit of quick-freezing: 1 — nitrogen freezing apparatus; 2, 6 — conveyors; 3 — fan; 4 — collectors with nozzles; 5 — air freezing and temperature equalizing apparatus; 7 — air-cooler

изменения ширины/длины конвейеров, за счет регулирования скорости их движения [10].

Одним из вариантов снижения экономической значимости относительно «высоких» затрат на одноразово используемый азот, является вариант применения криогенного способа для замораживания продукции высокой ценовой категории или требующей деликатного подхода ввиду физико-химических или биологических особенностей.

Так, в 2021, 2022 гг. были выполнены исследования по определению параметров криогенного замораживания мясного сырья из баранины и конины, стоимость которого может достигать нескольких тысяч рублей за килограмм, а доля затрат на азот, при средней стоимости  $\Pi_{аз} = 50$  руб/кг, будет незначительной.

При этом, в случае с кониной, мышечное волокно содержит специфическую пленку, разрушение которой технологически является нежелательным.

Для проведения исследований была сконструирована новая азотная мини камера, содержащая распределительный коллектор с четырьмя форсунками.

Камера сформирована на базе теплоизолированного корпуса бытового холодильника Shivaki, при этом выдержана оптимальная высота  $h = 0,2 \pm 0,22$  м размещения форсунок относительно стеллажа для размещения продукции. Такое расстояние обеспечивает при заданном факеле угла распыла  $60^\circ$  полное покрытие орошаемой поверхности стеллажа мелкодисперсными каплями кипящего жидкого азота.

В результате экспериментальных исследований были получены основные параметры криогенного замораживания баранины и конины, представленные графически данными на рис. 7, 8.

Как видно из графиков, показанных на рис. 8, 9, применение новой компактной мини камеры с рациональной организацией процесса орошения продукции жидким азотом, позволило существенно интенсифицировать процесс.

Продолжительность замораживания, по сравнению с предыдущими результатами, существенно снизилась, для случая с бараниной (рис. 8, а) до  $\tau = 9$  мин, а с кониной (рис. 9, а) — до  $\tau = 3,5$  мин.

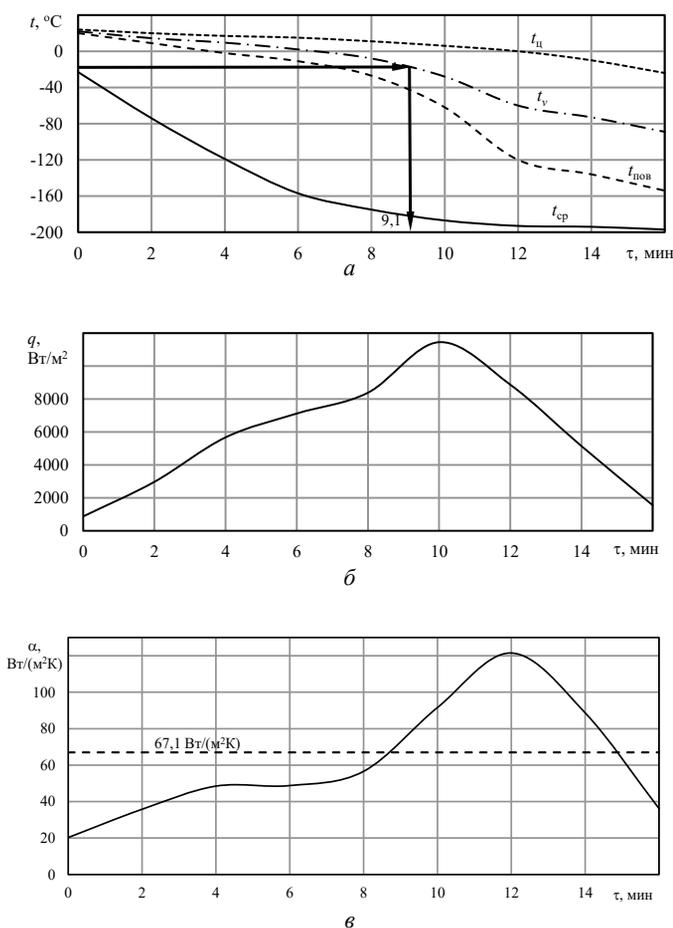


Рис. 7. Параметры криогенного замораживания баранины:  
а — термограмма  $t=f(\tau)$ ;

б — изменение плотности теплового потока  $q=f(\tau)$ ;

в — изменение коэффициента теплоотдачи  $\alpha=f(\tau)$

Fig. 7. Parameters of cryogenic freezing of lamb:

а — thermogram  $t=f(\tau)$ ;

б — changes of heat flux density  $q=f(\tau)$ ;

в — the changes of heat transfer coefficient  $\alpha=f(\tau)$

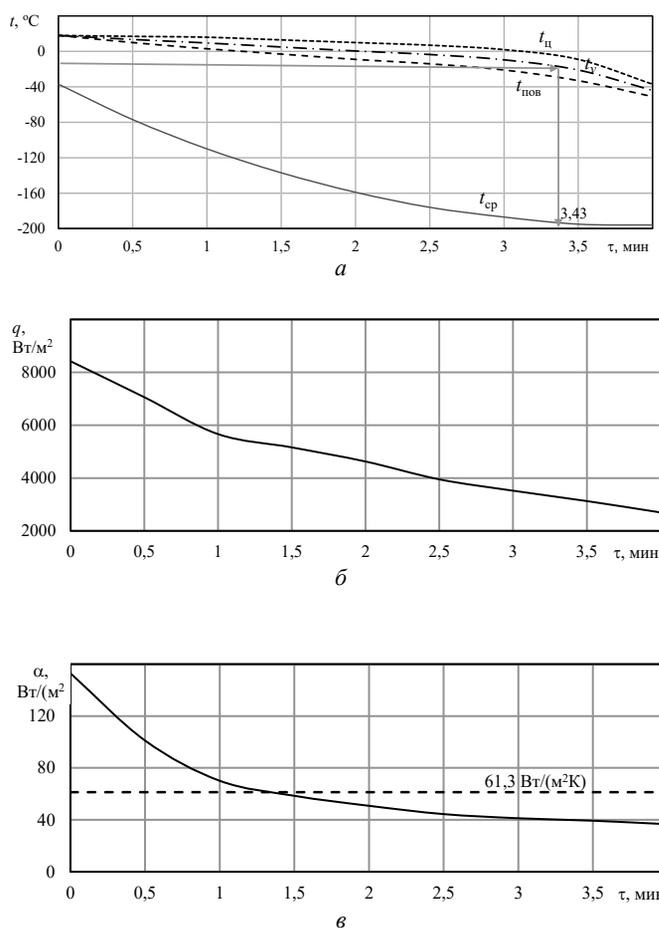


Рис. 8. Параметры криогенного замораживания конины:  
а — термограмма  $t=f(\tau)$ ;

б — изменение плотности теплового потока  $q=f(\tau)$ ;

в — изменение коэффициента теплоотдачи  $\alpha=f(\tau)$

Fig. 8. Parameters of cryogenic freezing of horse meat:

а — thermogram  $t=f(\tau)$ ;

б — changes of heat flux density  $q=f(\tau)$ ;

в — the changes of heat transfer coefficient  $\alpha=f(\tau)$

Важно отметить, что в первом случае (рис. 8, б) пик теплового потока или истинный «шок» наступает уже после достижения образцами баранины среднеобъемной температуры  $t_v = -18$  °С, а в случае с кониной «шок» наступает сразу при размещении образцов в грузовом отсеке мини камеры. Такая разница связана, в первую очередь, с оптимизацией условий организации процесса и отличиями в свойствах исследуемых образцов мясного сырья.

Однако, главным фактором, обеспечивающим уровень продолжительности замораживания  $\tau$  и итоговую производительность скороморозильной техники ( $G$ , кг/ч) является определяющий размер, в направлении которого осуществляется подвод охлаждающей среды к продукту. В случае с тушками бройлеров определяющим размером являлась толщина бедренной части  $\delta = 0,05$  м, для образцов баранины — толщина отреза  $\delta = 0,035 \div 0,04$  м, и для конины — толщина отреза  $\delta = 0,015$  м.

Полученные в результате исследований значения средней скорости замораживания (кристаллизации), для баранины —  $\omega_{cp} = 39,3 \cdot 10^{-6}$  м/с и для конины  $\omega_{cp} = 52,1 \cdot 10^{-6}$  м/с, соответствуют уровню «ультрабыстрого замораживания», которое характерно для операций криодробления. Однако, в нашем случае растрескивания продукта не происходит как раз по причине правильной организации истинного «шока» на начальной стадии процесса, который формирует на поверхности продукта защитный слой из мелкодисперсных кристаллов льда, препятствующий «ломанию» термического сопротивления продукта при дальнейшем орошении жидким азотом.

Для наглядной демонстрации на рис. 9 представлен общий вид образцов мясного сырья, замороженного криогенным, комбинированным (азот — воздух) или воздушным, для сравнения, способами.

Уже только визуальный осмотр образцов показывает очевидные преимущества криогенного способа замораживания. В сравнении с образцами, замороженными традиционным воздушным (при  $t_v = -30 \dots -35$  °С) способом, криогенно замороженные образцы обладают более привлекательным внешним видом, за счет отбеливающего эффекта и сохранения структуры мышечной ткани, за счет минимизации или даже отсутствия потерь массы продукта от усушки, обеспечиваемых инертностью применяемого криоагента — азота. При замораживании продукции традиционным воздушным способом с характерным увеличением длительности процесса имеет место частичное испарение влаги, что приводит к некоторому потемнению образцов и к снижению таких органолептических показателей, как цвет, вкус и запах.

Следующие этапы проводимых научных исследований были связаны с комплексной оценкой изменений в показателях пищевой и биологической ценности образцов мясного сырья, замороженных различными способами, на этапах сразу после замораживания, в течение 6 мес хранения и после размораживания [12].

Такие исследования проводились совместно со специалистами кафедры технологии и биотехнологии мяса и мясных продуктов РОСБИОТЕХ и специалистами федерального научного центра пищевых систем им. В. М. Горбатова» РАН.

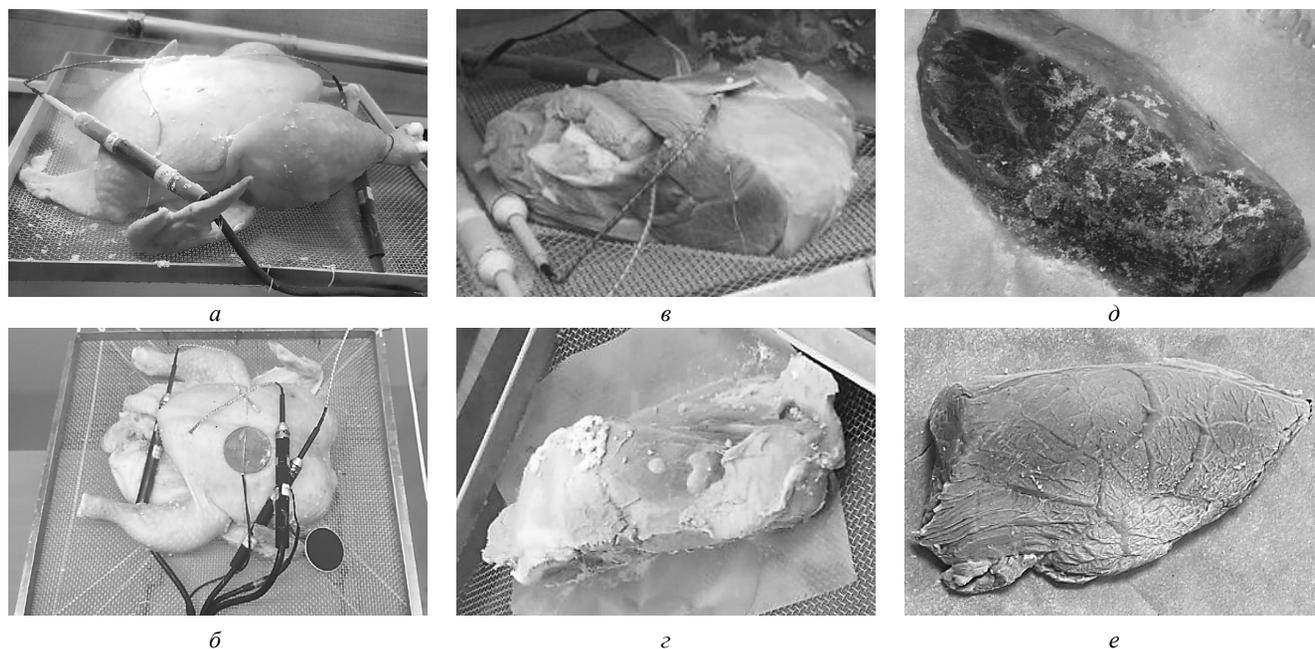


Рис. 9. Общий вид замороженных образцов мясного сырья:  
 а — тушки бройлеров комбинированным способом (азот — воздух); б — тушки бройлеров криогенным способом;  
 в — отрезки баранины воздушным способом; г — отрезки баранины криогенным способом;  
 д — отрезки конины воздушным способом; е — отрезки конины криогенным способом

Fig. 9. The samples of the frozen raw materials:  
 а — broilers frozen by combined (nitrogen-air) method;  
 в — lamb frozen by air method; г — lamb frozen by cryogenic method;  
 д — horse meat frozen by air method; е — horse meat frozen by cryogenic method

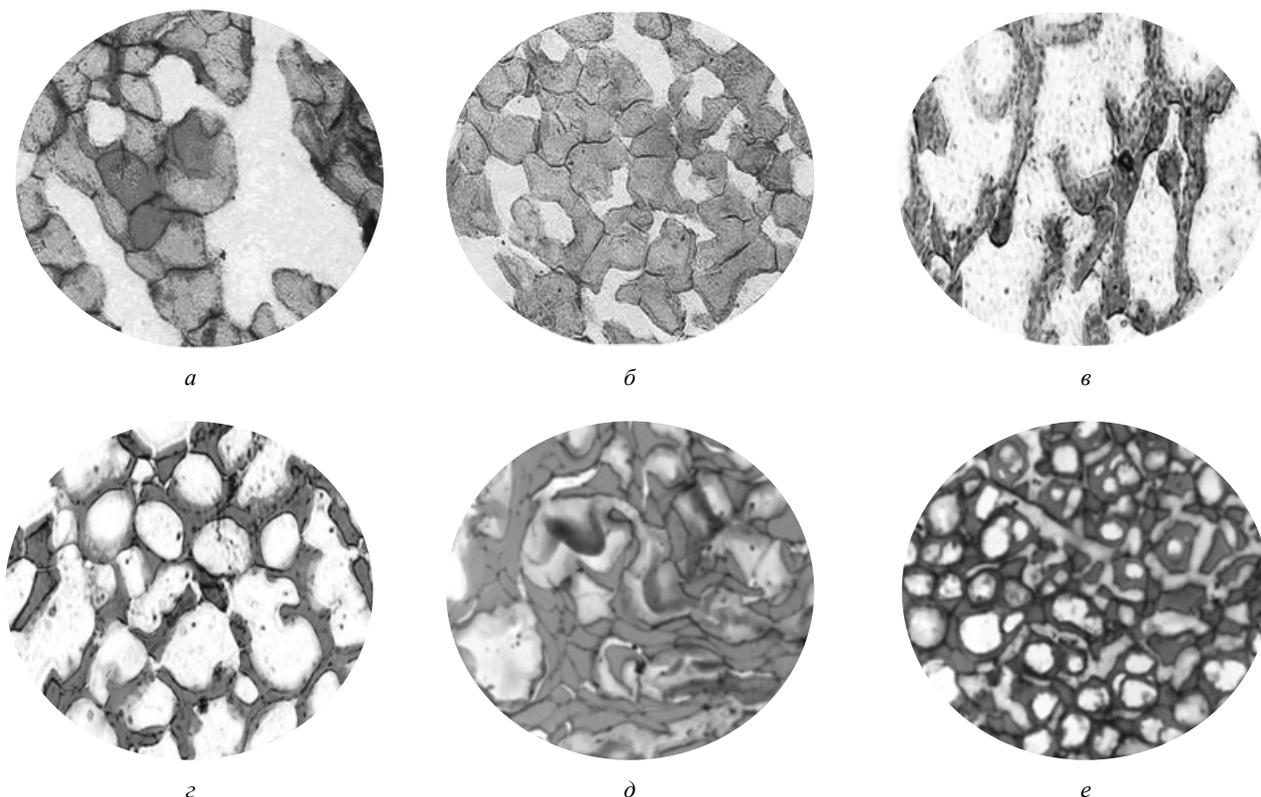


Рис. 10. Общий вид поперечной мышечной ткани: бройлеров, замороженных в воздухе (а) и в азоте (б); баранины, замороженной в воздухе (в) и в азоте (г) после 6 мес хранения; конины, замороженной в воздухе (д) и в азоте (е)

Fig. 10. Cross-sections of the muscle tissue of: broilers frozen by air (a) and nitrogen (б); баранины, frozen by air (в) and nitrogen (г) after six months' storage; конины frozen by air (д) and nitrogen (е)

Исследования включали в себя оценку химического состава образцов мясного сырья в нативном и замороженном состояниях, органолептических показателей, показателей пищевой и биологической ценности, возможные изменения в этих показателях спустя 6 мес хранения, оценку структурно-механических изменений и оценку потерь мясного сока при размораживании.

Для наглядной демонстрации, на рис. 10 представлена сравнительная оценка срезов образцов мясного сырья, замороженного традиционным воздушным и криогенным способами.

Представленные изображения поперечных срезов замороженного мясного сырья наглядно демонстрируют меньшую порозность в образцах, замороженных криогенным способом, что связано с локализацией образующихся кристаллов льда меньших размеров (рис. 9 б, г, е), и формированием их внутри волокон и даже внутри клеток, а не между волокнами, как в случае с воздушным способом замораживания.

Очевидно, что структурные образования льда в течение длительного периода хранения (6 мес) будут увеличиваться в размерах независимо от способа замораживания (рис. 9 в, г), но в образцах, замороженных криогенным способом, они меньше.

На следующем этапе исследований было установлено, что при размораживании образцов, замороженных в воздухе, крупные образования льда между волокнами уже при оттайке выделяются в виде жидкости из образца, в то время как для образцов, замороженных криоген-

ным методом, образующаяся жидкая фракция, преимущественно остается в структуре волокна, а это способствует существенному снижению потерь массы (до 0,15%), чем для образцов воздушного замораживания (на уровне 0,3–0,6%).

Результатом проведенных сравнительных исследований комплекса показателей качества замороженных образцов мясного сырья является подтверждение того, что при криогенном замораживании они подвергаются изменениям в наименьшей степени, что выражается в значениях структурно-механических, органолептических и физико-химических показателей и позволяет обосновать сохранность уровня пищевой и биологической ценности, а также диетичности рассматриваемых видов мясного сырья на высоком уровне.

Полученные результаты технологических исследований, подтверждающих приоритет криогенного способа замораживания перед другими, согласуются и с данными ряда зарубежных исследователей [13]–[16].

Для возможностей практического внедрения криогенного замораживания пищевого сырья и продуктов разработан эскизный проект новой модели азотного туннельного скороморозильного аппарата с соответствующей конструкцией распределительного коллектора с форсунками (рис. 11).

Конструкция аппарата рассчитана на производительность  $G=600$  кг/ч по мясному сырью с толщиной слоя не более  $\delta=0,05$  м и использует известный трехзонный принцип построения с зонами предварительного

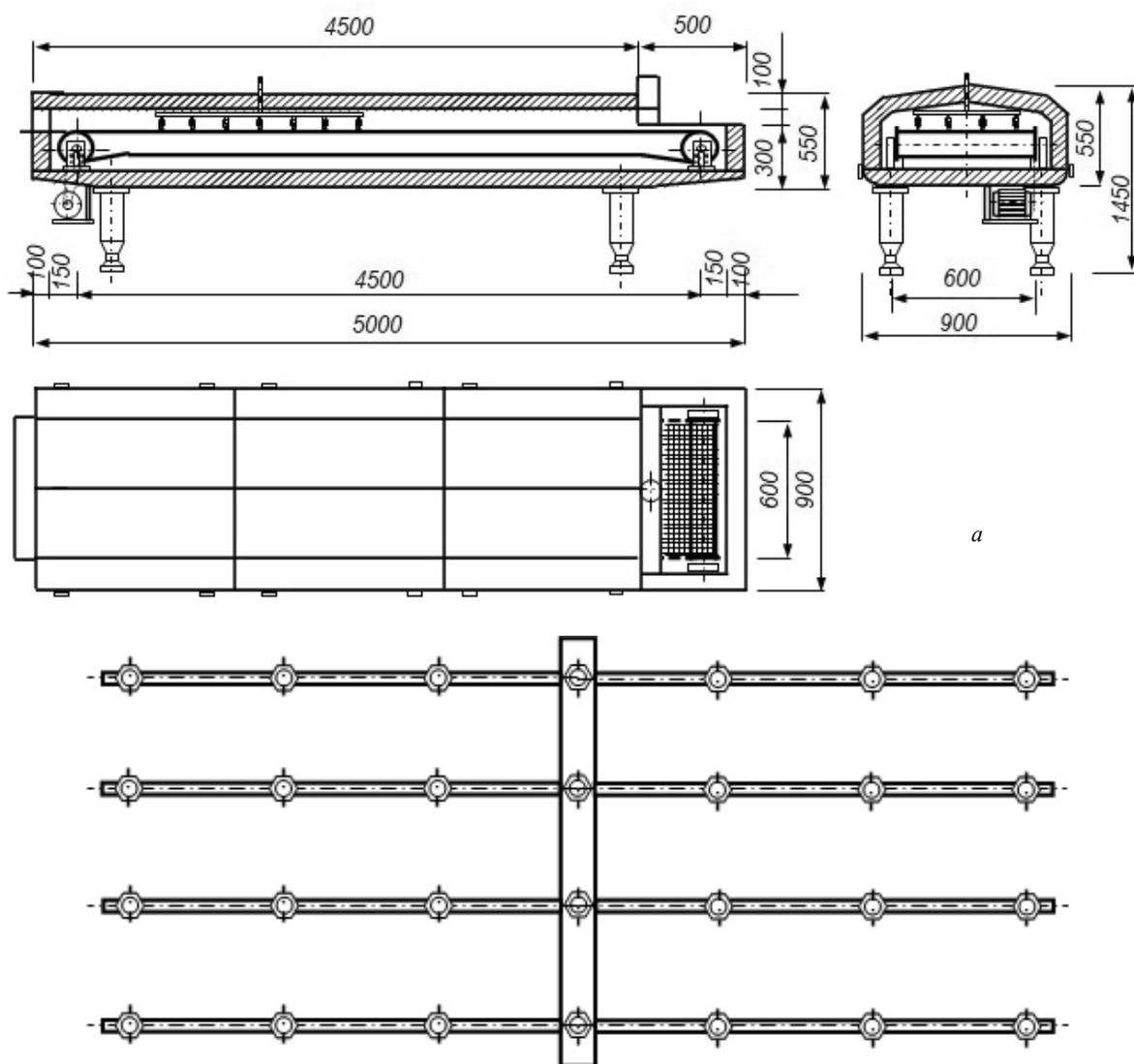


Рис. 11. Общий вид модели азотного туннельного скороморозильного аппарата (а) и распределительного коллектора (б)  
 Fig. 11. A prototype for nitrogen tunnel quick-freezing apparatus (a) and distribution collector (b)

охлаждения, кристаллизации и выравнивания температуры.

В качестве технической новизны предложено исключить циркуляционные вентиляторы, что позволяет снизить до минимума высоту верхней части корпуса аппарата, а интенсивную циркуляцию газообразного азота в первой зоне аппарата обеспечить силой действия вытяжной вентиляции. В этом случае потоки, образующегося при испарении под коллектором жидкости, газообразного азота будут направляться противотоком к движущемуся на конвейере продукту, интенсивно его обдувая, причем большая часть холодильного потенциала криоагента будет подводиться именно к продукту, а не к громоздким, как ранее, внутренним поверхностям корпуса.

Корпус аппарата (рис. 11, а) может быть выполнен на модульной основе с механическим открытием верхних крышек, что обеспечит доступ для обслуживания его внутренних узлов. Дополнительно к предлагаемой конструкции спроектирован вариант компоновки распределительного коллектора (рис. 11, б), рассчитанного на 28 распылительных форсунок, обеспечивающих фа-

келами распыла полное покрытие зоны орошения продукции жидким азотом.

Предлагаемое техническое решение азотного туннельного аппарата позволит существенно снизить энергопотребление, за счет отсутствия вентиляторов и привода подъема теплоизолированного короба, как это было предусмотрено в отечественных аппаратах АСТА и зарубежных аналогах, оптимизировать металлоемкость конструкции, и, следовательно, снизить стоимость аппарата, а также обеспечить требуемые рациональные режимы быстрого замораживания штучных пищевых продуктов широкого ассортимента.

### Заключение

Преимущества и перспективность криогенного способа замораживания пищевого сырья и продуктов вполне очевидны:

- использование в качестве рабочего тела низкотемпературной инертной среды (азота), позволяющее исключить нежелательные процессы окисления и микробиологической порчи;

— формирование в продукте кристаллов льда фактически на внутриклеточном уровне без разрушения структуры продукта, позволяющее сохранить влагу при размораживании и меньший процент потерь массы продукта от усушки;

— создание рациональных условий протекания процесса и достижение оптимальных значений скоростей замораживания (кристаллизации), гарантирующих подержание целого комплекса показателей пищевой и биологической ценности продукта на высоком уровне на этапах сразу после замораживания и в течение 6 мес хранения;

— применение менее энергопотребляемого скороморозильного оборудования с невысокими капитальными затратами.

Разумеется, данный способ имеет и один существенный недостаток, сдерживающий его широкое внедрение на производстве — это высокий расход и стоимость одноразово используемого криоагента. Однако, существуют различные способы снижения значимости этого недостатка, такие как:

— рационализация подачи криоагента в корпус приемников холода (скороморозильный туннель, холодильная камера), что на практике позволяет сократить его расход

от практических 1,5–2 кг/кг продукта до 1–1,3 кг/кг, а в ряде случаев до теоретических значений 0,5–0,8 кг/кг;

— реализация максимально возможных температурных уровней проточной системы хладоснабжения, за счет использования отработанных паров на этапах хранения и для прочих технологических целей, которая позволяет использовать до 90–95% температурного потенциала низкокипящего криоагента;

— применение технических способов регенерации теплоты испарения жидкого азота, например, за счет его частичного ожижения в вихревой трубе, установленной в корпусе приемника холода [17];

— снижение влияния оптовой себестоимости 1 кг жидкого азота, с учетом региона производства, по отношению к конечной розничной цене продукта;

— уменьшение затрат на получение криоагента за счет открытия его производства на территории того же пищевого предприятия, например, с помощью воздухо-разделительных установок, где помимо азота можно получать и другие криовещества (кислород, аргон, гелий), прибыль от реализации которых может полностью покрыть затраты на производство исходного пищевого продукта.

## Литература

1. Ишевский А. Л., Давыдов Л. А. Замораживание как метод консервирования пищевых продуктов // Теория и практика переработки мяса. 2017. № 2. с. 43–59.
2. Кузнецов А. А., Феськов О. А. Исследование параметров процесса замораживания творога криогенным методом // Сборник научных трудов «Проблемы современного мира глазами молодежи», под общей редакцией Н. М. Мекеко. 2020. с. 76–88.
3. Антонов А. А., Венгер К. П. Азотные системы хладоснабжения для производства быстрозамороженных пищевых продуктов. Монография. Рязань: Узороchie, 2002, 205 с.
4. Сороко О. А., Усеня Ю. В. Анализ способов замораживания пищевых продуктов // Наука и инновации. 2011. № 5 (90). с. 18–23.
5. Семенов Г. В., Краснова И. С., Хвилья С. И., Балаболин Д. Н. Влияние акустического замораживания на показатели структуры сублимированной клубники // Хранение и переработка сельхозпродукции. 2019. № 3. с. 29–41.
6. New International Dictionary of Refrigeration. Paris: Institute international du froid. 1976. XXXVII, 560 p.
7. Ишевский А. Л., Шульга А. С., Родионова А. Л., Гришина И. В. Криогенное замораживание пищевых продуктов // Мясные технологии. 2009. № 4. с. 30–32.
8. Патент РФ № 2113665. Скороморозильный туннельный аппарат. К. П. Венгер, Н. Ф. Денисов, С. В. Суетин, опубл. в БИ ФИПС № 20 от 20.06.98.
9. Танченко Т. Н., Феськов О. А. Перспективы использования комбинированного метода замораживания пищевых продуктов // Молодой ученый. 2019. № 21. с. 120–124.
10. Танченко Т. Н., Феськов О. А. Исследование процесса замораживания тушек птицы комбинированным способом // Мясные технологии. 2019. № 10. с. 8–14.
11. Горячкина А. С., Литвинова Е. В., Феськов О. А. Исследование процесса замораживания тушек птицы методом орошения жидким азотом // Мясные технологии. 2020. № 7. с. 16–21.

## References

1. Ishevsky A. L., Davydov L. A. Freezing as a method of food preservation. *Theory and practice of meat processing*. 2017. no 2. p. 43–59. (in Russian)
2. Kuznetsov A. A., Feskov O. A. Research of the parameters of the process of freezing cottage cheese by the cryogenic method. Collection of scientific works «Problems of the modern world through the eyes of young people,» edited by N. M. Mekeko. 2020, p. 76–88. (in Russian)
3. Antonov A. A., Venger K. P. Nitrogen cold supply systems for the production of quickly frozen food products. Monograph. Ryazan, Uzorochie, 2002, 205 p (in Russian)
4. Soroko O. A., Usenya Y. V. Analysis of Methods of Freezing Food Products. *Science and Innovation*. 2011. no 5 (90). p. 18–23. (in Russian)
5. Semenov G. V., Krasnova I. S., Khvylia S. I., Balabolin D. N. The influence of micro-vibration on the structure of freeze-dried strawberry. *Storage and processing of agricultural products*. 2019. no 3. p. 29–41. (in Russian)
6. New International Dictionary of Refrigeration. Paris: Institute international du froid. 1976. XXXVII, 560 p.
7. Ishevsky AL, Shulga AS, Rodionova AL, Grishina I. V. Cryogenic freezing of food products. *Meat technologies*. 2009. no 4. p. 30–32. (in Russian)
8. Patent of the Russian Federation. no 2113665. Quick-freezing tunnel apparatus. K. P. Venger, N. F. Denisov, S. V. Suetin, publ. in Bull. FIPS. no 20, 20.06.98. (in Russian)
9. Tanchenko T. N., Feskov O. A. Prospects for the Use of the Combined Method of Freezing Food Products. *Young Scientist*. 2019. no 21. p. 120–124. (in Russian)
10. Tanchenko T. N., Feskov O. A. Study of the process of freezing poultry carcasses by combined method. *Meat technologies*. 2019. no 10. p. 8–14. (in Russian)
11. Goryachkina A. S., Litvinova E. V., Feskov O. A. Study of the process of freezing poultry carcasses by liquid nitrogen irrigation. *Meat Technologies*. 2020. no 7. p. 16–21. (in Russian)

12. Литвинова Е. В., Артамонова М. П., Бухтеева Ю. М. Сравнительная оценка способов замораживания мясного сырья с различным характером автолиза // *Health, Food & Biotechnology*. 2020. 2 (2). P. 103–115.
13. Beltrán J. A., & Bellés M. Effect of freezing on the quality of meat // *Encyclopedia of Food Security and Sustainability*. 2019. vol. 2. pp. 493–497.
14. Egelandsdal B., Bjarnadottir S., Mebre Abie S., Zhu H., Kolstad H., Bjerke F., Martinsen Q. G., Mason A., Münch D. Detectability of the degree of freeze damage in meat depends on analytic tool selection // *Meat Science*. 2019. Vol. 152. p. 8–19.
15. Kim H.-W., Kim J.-H., Seo J.-K., Setyabrata D., Brad Kim Y. H. Effects of aging/freezing sequence and freezing rate on meat quality and oxidative stability of pork loins // *Meat Science*. 2018. Vol. 139. P. 162–170.
16. Sales L. A., Mendes Rodrigues L., Guimarães Silva D. R., Fontes P. R., de Almeida Torres Filho R., de Lemos Souza Ramos A., Ramos E. M. Effect of freezing/irradiation/thawing processes and subsequent aging on tenderness, color, and oxidative properties of beef // *Meat Science*. 2020. Vol. 163. P. 143–148.
17. Патент РФ № 2460021. Азотный туннельный аппарат / К. П. Венгер, И. Б. Жильцов, М. Г. Носов и др., опубли. в БИ ФИПС № 24, 27.08.12
12. Litvinova E. V., Artamonova M. P., Bukhteeva J. M. Comparative evaluation of methods for freezing meat raw materials with a different nature of autolysis. *Health, Food & Biotechnology*. 2020. 2 (2). p. 103–115. (in Russian)
13. Beltrán J. A., & Bellés M. Effect of freezing on the quality of meat. *Encyclopedia of Food Security and Sustainability*. 2019. vol. 2. pp. 493–497.
14. Egelandsdal B., Bjarnadottir S., Mebre Abie S., Zhu H., Kolsstad H., Bjerke F., Martinsen Q. G., Mason A., Münch D. Detectability of the degree of freeze damage in meat depends on analytic tool selection. *Meat Science*. 2019. Vol. 152. p. 8–19.
15. Kim H.-W., Kim J.-H., Seo J.-K., Setyabrata D., Brad Kim Y. H. Effects of aging/freezing sequence and freezing rate on meat quality and oxidative stability of pork loins. *Meat Science*. 2018. Vol. 139. P. 162–170.
16. Sales L. A., Mendes Rodrigues L., Guimarães Silva D. R., Fontes P. R., de Almeida Torres Filho R., de Lemos Souza Ramos A., Ramos E. M. Effect of freezing/irradiation/thawing processes and subsequent aging on tenderness, color, and oxidative properties of beef. *Meat Science*. 2020. Vol. 163. P. 143–148.
17. Patent of the Russian Federation. no 2460021. Nitrogen tunnel apparatus. / K. P. Venger, I. B. Zhiltsov, M. G. Nosov and others, publ. in BI FIPS no 24, 27.08.12. (in Russian)

### Сведения об авторах

#### Феськов Олег Алексеевич

К. т. н., доцент, и. о. зав. кафедрой «Инженерия процессов, аппаратов, холодильной техники и технологий», Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ), 125080, Москва, Волоколамское ш., 11, Feskov76@mail.ru, ORCID ID: 0009-0004-8468-6704

#### Стефанова Виктория Александровна

К. т. н., доцент кафедры «Инженерия процессов, аппаратов, холодильной техники и технологий», Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ), 125080, Москва, Волоколамское ш., 11, victoriavass@mail.ru, ORCID ID: 0009-0000-5391-6061

#### Кузьмина Ирина Анатольевна

К. т. н., доцент кафедры «Инженерия процессов, аппаратов, холодильной техники и технологий», Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ), 125080, Москва, Волоколамское ш., 11, irinakuzmina2012@bk.ru, ORCID ID: 0009-0007-9453-2073

### Information about authors

#### Feskov Oleg A.

Ph. D., Associate Professor, acting Head of Department «Engineering of Processes, Apparatuses, Refrigeration Equipment and Technologies», Russian Biotechnology University (ROSBIOTECH) 125080, Russia, Moscow, Volokolamskoe sh., 11, Feskov76@mail.ru, ORCID ID: 0009-0004-8468-6704

#### Stefanova Victoria A.

Ph. D., Associate Professor of Department «Engineering of Processes, Apparatuses, Refrigeration Equipment and Technologies», Russian Biotechnology University (ROSBIOTECH) 125080, Russia, Moscow, Volokolamskoe sh., 11, victoriavass@mail.ru, ORCID ID: 0009-0000-5391-6061

#### Kuzmina Irina A.

Ph. D., Associate Professor of Department «Engineering of Processes, Apparatuses, Refrigeration Equipment and Technologies», Russian Biotechnology University (ROSBIOTECH) 125080, Russia, Moscow, Volokolamskoe sh., 11, irinakuzmina2012@bk.ru, ORCID ID: 0009-0007-9453-2073



Статья доступна по лицензии  
Creative Commons «Attribution-NonCommercial»