

Minimizing Energy Consumption During the Cryopreservation Process of Plant Products

Mitropov V.V., Rumiantceva O.N., Pluzhnikova D.V., Polonskaya M.S., Shulgan K.A.,
Sigunov R.V., Shein V.M.

ITMO University
St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. The article studies the energy efficiency of plant products cryopreservation and the ways to optimize the operating modes of refrigeration equipment. The aim of the work is to develop rational modes of plant products freezing in order to minimize energy costs. The tasks were solved: study of the effect of freezing conditions on the process kinetics and energy costs; effect assessment of morphological structure on the internal thermal resistance of objects; search of indirect control of the product state based on the energy characteristics of the system. The object of the study was the cryopreservation of samples with different tissue structures (blanched apple and cranberry) in the experimental stand with a static cooling system. It was found that under identical conditions ($t = -15\text{ }^{\circ}\text{C}$), the processing time of cranberries was ~ 4.75 h (cryoscopic plateau - ~ 1.5 h); for blanched apples - ~ 7.2 and ~ 2.5 hours, respectively. Blanching reduces the effective product thermal conductivity, increasing the phase transition time. The most important result is to find the relationship between changes in the compressor duty cycle and the phase transition stage in plant products. Significant undercooling in cranberries ensures a high rate of nucleation of small crystals at low heat dissipation rates. The significance of these results lies in the development of a method for indirectly monitoring the freezing process through standard automation systems without the use of invasive sensors. This allows for the optimization of control algorithms and the reduction of unproductive energy consumption in refrigeration systems.

Keywords: freezing, supercooling, cryoscopic plateau, compressor duty cycle, blanching, cranberries, apple, static chamber.

DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2026.1-69.11>

UDC: 621.57:664.8.037

Minimizarea consumului de energie în timpul procesului de crioconservare a produselor vegetale

Mitropov V.V., Rumianțeva O.N., Plujnikova D.V., Polonskaya M.S., Șulgan K.A., Sigunov R.V.,
Șein V.M.

Universitatea ITMO, Sanct-Petersburg, Federația Rusă

Rezumat. Articolul studiază eficiența energetică a crioconservării produselor vegetale și modalitățile de optimizare a modurilor de funcționare ale echipamentelor de refrigerare. Scopul lucrării este de a dezvolta moduri raționale de congelare a produselor vegetale pentru a minimiza costurile energetice. Sarcinile au fost rezolvate: studiul efectului condițiilor de congelare asupra cineticii procesului și a costurilor energetice; evaluarea efectului structurii morfologice asupra rezistenței termice interne a obiectelor; căutarea controlului indirect al stării produsului pe baza caracteristicilor energetice ale sistemului. Obiectul studiului a fost crioconservarea probelor cu diferite structuri tisulare (măr și merișor albite) în standul experimental cu sistem de răcire static. S-a constatat că, în condiții identice ($t = -15\text{ }^{\circ}\text{C}$), timpul de procesare a merișoarelor a fost de ~ 4.75 ore (platou crioscopic - ~ 1.5 ore); pentru merele opărite - ~ 7.2 și respectiv ~ 2.5 ore. Opărirea reduce conductivitatea termică efectivă a produsului, crescând timpul de tranziție de fază. Cel mai important rezultat este găsirea relației dintre modificările ciclului de funcționare al compresorului și stadiul de tranziție de fază în produsele vegetale. Subrăcirea semnificativă a merișoarelor asigură o rată ridicată de nucleație a cristalelor mici la rate scăzute de disipare a căldurii. Semnificația acestor rezultate constă în dezvoltarea unei metode de monitorizare indirectă a procesului de congelare prin sisteme standard de automatizare, fără utilizarea senzorilor invazivi. Acest lucru permite optimizarea algoritmilor de control și reducerea consumului de energie neproductiv în sistemele de refrigerare.

Cuvinte-cheie: congelare, superrăcire, platou crioscopic, ciclul de funcționare al compresorului, opărire, merișoare, măr, cameră statică.

Минимизация энергозатрат в процессе криоконсервирования растительной продукции
Митропов В.В., Румянцева О.Н., Плужникова Д.В., Полонская М.С., Шулган К.А., Сигунов Р.В.,
Шенин В.М.

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. Статья посвящена исследованию энергетической эффективности процессов криоконсервирования растительной продукции и поиску путей оптимизации режимов работы холодильного оборудования. Целью работы является разработка и исследование рациональных режимов обработки холодом растительной продукции в процессе ее криоконсервирования для минимизации энергозатрат. Для достижения цели были решены задачи: экспериментальное изучение влияния условий замораживания на кинетику процесса и удельные энергозатраты; оценка влияния морфологической структуры и предварительной термообработки на внутреннее термическое сопротивление объектов; анализ возможности косвенного контроля состояния продукта на основе энергетических характеристик системы. Объектом исследования являлся процесс криоконсервирования двух типов образцов с различной тканевой структурой (бланшированное яблоко и клюква) в экспериментальном стенде со статической системой охлаждения. Установлено, что при идентичных условиях ($t = -15\text{ }^{\circ}\text{C}$) время обработки ягод клюквы составляет ~ 4.75 ч (криоскопическое плато — ~ 1.5 ч); для бланшированных яблок эти показатели возрастают до ~ 7.2 ч и ~ 2.5 ч, соответственно. Показано, что бланширование снижает эффективную теплопроводность продукта, увеличивая время фазового перехода. Наиболее важным результатом является установление зависимости между изменением коэффициента рабочего времени компрессора и стадией фазового перехода в растительном продукте. Выявлено, что значительное переохлаждение в ягодах клюквы обеспечивает высокую скорость нуклеации мелких кристаллов, что минимизирует деструкцию клеточных структур при низких скоростях отвода теплоты. Значимость полученных результатов заключается в разработке методики косвенного контроля процесса замораживания через штатные системы автоматизации без использования инвазивных датчиков. Это позволяет оптимизировать алгоритмы управления и снизить непроизводительные энергозатраты в системах хладоснабжения.

Ключевые слова: замораживание, переохлаждение, криоскопическое плато, коэффициент рабочего времени компрессора, бланширование, клюква, яблоко, статическая камера.

ВВЕДЕНИЕ

Глубокое замораживание пищевых продуктов остается одним из наиболее эффективных методов сохранения их пищевой ценности, органолептических свойств и безопасности в течение длительного времени [1]. Процесс замораживания, несмотря на кажущуюся простоту, представляет собой сложный тепло- и массообменный процесс, сопровождаемый фазовыми переходами воды и растворенных веществ. Эффективность этого процесса напрямую определяет не только конечное качество продукта (микроструктуру, степень повреждения клеток, потери влаги при размораживании), но и существенные энергозатраты, связанные с работой холодильного оборудования [2–5].

Применение шоковой и быстрой заморозки в промышленных условиях хорошо изучено [5–9], однако особенности процесса в бытовых морозильных установках требуют дополнительного изучения. В таких камерах теплообмен преимущественно осуществляется за счет естественной конвекции и теплового излучения, а его интенсивность, как правило, недостаточна для обеспечения высокой скорости замораживания. В условиях глобальной

повестки по повышению энергоэффективности и снижению углеродного следа пищевой промышленности, оптимизация режимов замораживания и последующего хранения становится критически важной задачей [10, 11].

Целью настоящей работы является комплексное экспериментальное исследование кинетики процесса замораживания различных пищевых продуктов с одновременным мониторингом энергопотребления.

Для проведения исследования был разработан специализированный лабораторный стенд, позволяющий с высокой точностью регистрировать температурные профили продуктов и ключевые параметры работы холодильного агрегата. В качестве объектов исследования были выбраны клюква (натуральный продукт с высоким содержанием органических кислот) и бланшированные яблоки (продукт, подвергнутый предварительной тепловой обработке, существенно изменяющей структурные свойства) [12]. Сравнительный анализ этих двух объектов позволяет выявить влияние как природы сырья, так и технологической обработки на динамику

замораживания и связанные с ней энергетические затраты.

Основная задача работы — выявить доминирующий механизм теплообмена, разработать методику контроля завершения процесса по динамике энергопотребления установки.

МЕТОДЫ, РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Исследования проводились на лабораторном стенде, созданном на базе коммерческого горизонтального морозильного ларя ESPERANZA CFS 110 FW (рис.1).



Рис. 1. Внешний (а) и внутренний (б) вид горизонтального морозильного ларя ESPERANZA CFS 110 FW.
Fig.1.External (a) and internal (b) view of the horizontal chest freezer ESPERANZA CFS 110 FW.

Для обеспечения требуемой точности и минимизации температурных флуктуаций механический термостат был заменен на программируемый электронный термостат Carel PJEASY (модель PJEZC00000, Италия), реализующий алгоритм управления «установка с мертвой зоной».

Для полного контроля температурных полей реализована трехуровневая система измерения [13]:

- Уровень 1 (объем камеры): основной контроллер Carel PJEASY с датчиком NTC, в центре рабочего объема.
- Уровень 2 (объем продукта): дополнительный контроллер Carel PJEASY с датчиком NTC, в центре одного из образцов.
- Уровень 3 (высокоточная регистрация): двухканальный электронный регистратор «Параграф» PL20 (производство Россия). К нему подключены термодатчики типа К, введенные в центр каждого образца.

Для комплексной оценки энергоэффективности в цепь питания морозильного ларя интегрирован однофазный измеритель электроэнергии Peacefair PZEM-016 с интерфейсом RS485 Modbus RTU. Прибор регистрирует напряжение, ток, активную мощность и потребленную энергию. В качестве центральной SCADA-системы и архиватора данных использовался локальный сервер диспетчеризации Carel BOSSmini.

Модернизированный лабораторный стенд (Рис. 2) представляет собой инструмент для проведения высокоточных сравнительных исследований в условиях свободной конвекции.



Рис. 2. Лабораторный стенд.
Fig.2. Laboratory stand.

В качестве исследуемых образцов использовались ягоды клюквы (*Vaccinium macrocarpon*) и бланшированные яблоки. Каждый образец имел массу 500 г и был упакован в вакуумный пакет ПЭ/ПА толщиной 90 мкм.

Образец 1 (Т1): свежая клюква (*Vaccinium oxycoccos*), собранная в Ленинградской области, 2025 г. Ягоды были отобраны однородные по размеру и степени зрелости. Предварительная обработка отсутствовала.

Образец 2 (Т2): яблоки «Штрифель», урожая 2025 г., собранные в Ленинградской области в технической степени зрелости, подвергнутые бланшированию. Яблоки были очищены от кожуры, нарезаны кубиками со стороной 10 ± 2 мм и бланшированы в 0,5 % растворе лимонной кислоты при 95 ± 2 °С в течение 3 минут с последующим охлаждением в воде.

Оба образца (массой по 500 ± 10 г каждый) были размещены на одной подвесной сетке в центре холодильной камеры (≈ 15 см от стенок) для обеспечения одинаковых условий конвективного теплообмена.

Условия эксперимента: Температура в камере (t_{kam}) была установлена на уровне $-15 \pm 1^\circ\text{C}$. Выбор температуры определялся необходимостью изучения возможности перехода температур при замораживании с существующих -18°C на -15°C (так называемая инициатива «Переход к -15°C »). Начальная температура образцов (t_{in}) составляла $+18 \pm 1^\circ\text{C}$.

Измерения включали: T_1 (центр образца №1), T_2 (центр образца №2), t_{kam} , потребляемую мощность (Вт).

Замораживание растительных продуктов - это сложный тепло- и массообменный процесс, который регулируется законами термодинамики и теплопередачи. Кинетика процесса, то есть скорость снижения температуры продукта, определяется балансом между отводом тепла от поверхности продукта и его переносом из центра к поверхности.

Процесс замораживания делится на три термодинамические стадии, каждая из которых требует отвода определенного количества энергии (рис.4):

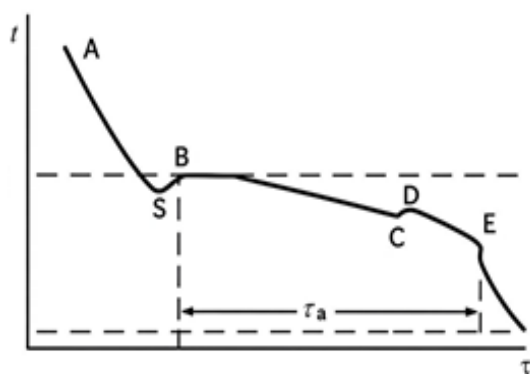


Рис. 3. Теоретическая кривая замораживания пищевого продукта (t – температура в центре продукта, τ – время). Обозначены основные фазы:

AS – охлаждение, S –переохлаждение, SB – начало кристаллизации, BC – плато замораживания, CDE – кристаллизация растворенных веществ, EF – окончательное охлаждение

Fig.3. Theoretical freezing curve of a food product (t is the temperature at the center of the product, τ is time). The main phases are indicated:

AS – cooling, S – supercooling, SB – onset of crystallization, BC – freezing plateau, CDE – crystallization of dissolved substances, EF – final cooling.)

Охлаждение до криоскопической точки (t_f): отводится явная теплота продукта.

Фазовый переход: отводится скрытая теплота кристаллизации, которая составляет до 80% от общей тепловой нагрузки. В отличие от чистой воды, в растворах (клеточный сок) кристаллизация происходит в диапазоне температур (наклонное плато), а не при фиксированной точке.

Доохлаждение: отводится явная теплота уже замороженного продукта.

Скорость отвода тепла (Q) определяется общим термическим сопротивлением (R_{total}) (1), которое складывается из:

$$R_{total} = R_{surface} + R_{internal} \quad (1)$$

Поверхностное сопротивление ($R_{surface}$): определяется условиями теплообмена между продуктом и воздухом камеры. В статических камерах доминирует свободная конвекция и тепловое излучение.

Внутреннее сопротивление ($R_{internal}$): определяется коэффициентом теплопроводности продукта.

Для цельных растительных тканей, особенно ягод, характерно явление переохлаждения (нуклеационного барьера).

Суть явления заключается в том, что вода в клеточном соке может оставаться в жидком состоянии при температуре ниже точки заморзания (t_f) из-за отсутствия центров кристаллизации.

Механизм переохлаждения выглядит следующим образом: температура продукта резко падает ниже t_f (до $-5... -10^\circ\text{C}$). Как только происходит случайная нуклеация (образование первого кристалла льда), выделяется скрытая теплота, и температура мгновенно "подскакивает" обратно к t_f .

Глубокое переохлаждение приводит к быстрой кристаллизации и формированию мелких кристаллов льда, что минимизирует механическое повреждение клеточных стенок и сохраняет текстуру продукта.

Кинетика замораживания сильно зависит от структуры и химического состава продукта. Так, нарушение клеточных стенок (например, бланшированием) снижает эффективную теплопроводность (λ_{eff}), увеличивая $R_{internal}$ и замедляя процесс замораживания [14]. А высокое содержание растворенных веществ (сахаров, кислот) снижает криоскопическую точку (t_f) и приводит к более наклонному

плато фазового перехода (криоскопический эффект) [15,16].

На графике (Рис.4) представлены температурные кривые замораживания двух растительных продуктов — ягод клюквы (Т1) и бланшированных яблок (Т2) — в сравнении с температурой воздуха камеры (t_{kam}) на протяжении 57-часового цикла. В Таблице 1 представлена сравнительная динамика замораживания исследуемых продуктов.

Оба образца массой по 500 г, упакованные в пленку, демонстрируют классическую трёхстадийную сигмоидальную кинетику: предварительное охлаждение, фазовый переход и доохлаждение. Ключевое различие заключается в продолжительности процесса, обусловленной спецификой микроструктуры продуктов.

Начальная температура образцов составляла ≈ 18 °С.

Клюква (Т1, красная линия) замораживается существенно быстрее: общее время достижения -14 °С составляет ~ 4.75 часа, а фаза плато (диапазон $-2... -5$ °С) длится около 1.5 часа. Это объясняется структурой целой ягоды: воздушные полости и плотная кожа, несмотря на локальное увеличение сопротивления, в целом способствуют эффективному отводу тепла [17, 18].

Бланшированные яблоки (Т2, зеленая линия) требуют больше времени (~ 7.2 часа), а их плато фазового перехода протяженнее ~ 2.5 часа).

Бланширование перед замораживанием применяется для растительной ткани с высокой активностью тканевых ферментов, приводящих к потемнению продуктов при дальнейшем холодильном хранении.

Изменение коллоидного состояния растительной ткани при воздействии тепла при бланшировании приводит к тому, что растительная ткань становится более мягкой и проницаемой вследствие частичной денатурации белков, плазмолиза клеток, коагуляции протоплазмы и ослабления связи между клетками.

Термическая обработка яблок бланшированием приводит к разрыву клеточных стенок и высвобождению влаги, что формирует рыхлую структуру с пониженной эффективной теплопроводностью (λ_{eff}), замедляющую отвод скрытой теплоты кристаллизации [19, 20].

Температура камеры (t_{kam} , чёрная линия) отражает реакцию системы на начальную тепловую нагрузку и последующую стабилизацию на уровне -15 °С. Синхронные колебания на всех кривых после времени эксперимента-22:00 соответствуют циклам работы компрессора в стационарном режиме при низком коэффициенте рабочего времени ($\sim 30\%$).

Структура продукта является определяющей для скорости процесса. Нативная ягода клюквы замерзает быстрее, чем бланшированные яблоки с нарушенной тканевой структурой.

Отсутствие выраженного переохлаждения (*supercooling*) у яблок связано с обилием центров кристаллизации в высвобожденном клеточном соке после бланширования [21, 22].

Быстрая стабилизация температуры камеры свидетельствует о достаточной мощности оборудования. Небольшая амплитуда колебаний температуры продукта относительно колебаний t_{ch} обусловлена значительной тепловой инерцией образцов массой 500 г.

Наблюдаемое замедление замораживания объясняется тем, что эффективная теплопроводность замороженных бланшированных яблок $\lambda_{fr(apple)}$ ниже, чем у замороженной клюквы $\lambda_{fr(cranberries)}$ [23].

Этот результат количественно подтверждает доминирующую роль структурных изменений от бланширования в увеличении внутреннего теплового сопротивления и времени замораживания. Бланширование приводит к разрыву клеток, высвобождению влаги и образованию рыхлой структуры, облегчая нуклеацию, но ухудшая теплоперенос [24,25].

Эксперимент подтверждает, что даже в статической камере достигается режим, близкий к шоковому замораживанию, с относительно быстрым прохождением критической зоны кристаллообразования ($-5...-18$ °С), что минимизирует повреждение тканей.

Для оптимизации процесса замораживания необходимо учитывать видовые и структурные особенности сырья. Целые нативные ягоды (клюква) не требуют коррекции режима замораживания. Для бланшированных плодов (яблоки) целесообразно уменьшать геометрические размеры нарезки или применять

принудительную конвекцию для компенсации сниженной теплопроводности.

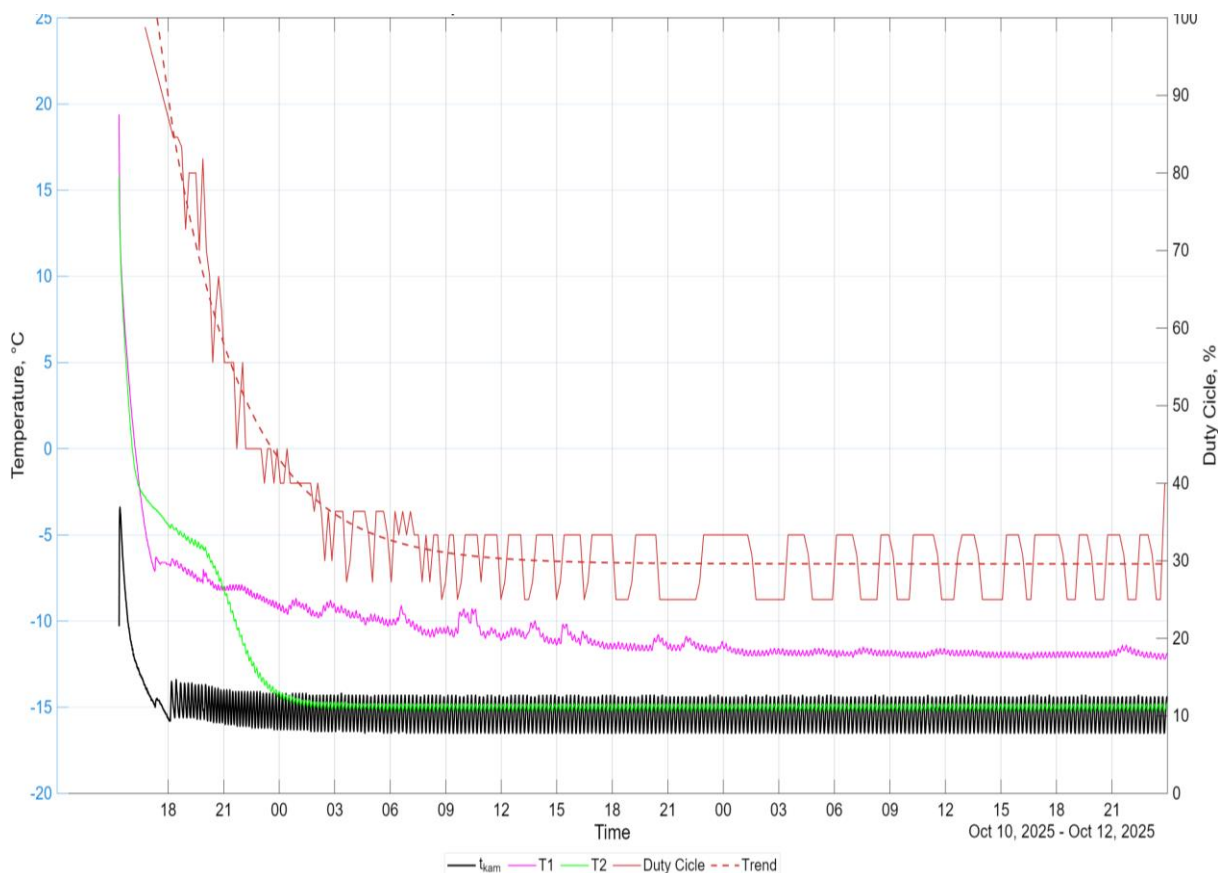


Рис. 4. Сравнение T1(клюква), T2 (яблоки) и КПВ (DC).

Fig.4.Comparison of T1 (cranberries), T2 (apples) and duty cycle. (Cranberry (T1, red line), Blanched apples (T2, green line), t_{kam} , black line).

Таблица 1

Сравнительная динамика процессов (Comparison of Power and duty cycle)

Образец (Sample)	Криоскопическая температура (Cryoscopic Temperature) (t_f)	Продолжительность плато (Plateau Duration)	Общее время замораживания (до $-14\text{ }^{\circ}\text{C}$) (Total Freezing Time (down to $-14\text{ }^{\circ}\text{C}$))
Бланшированные яблоки (Blanched apples)	$\approx -1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$	≈ 2.5 часа (с 17:30 до 21:00) ($\approx 2,5$ hours (from 17:30 to 21:00))	≈ 7.2 часа (≈ 7.2 hours)
Клюква (Cranberries)	$\approx -2\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\approx -2\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$)	≈ 1.5 часа (≈ 1.5 hours)	≈ 4.75 часа (≈ 4.75 hours)

Коэффициент рабочего времени (КРВ, Duty Cycle (DC)) компрессора является

прямым индикатором тепловой нагрузки на установку. В переходном режиме КРВ (DC)

стремится к 100%. Стационарный режим достигается, когда тепловая нагрузка от продукта приближается к нулю, и компрессор компенсирует только теплопритоки через изоляцию (2).

$$DC_{st} = \frac{\tau_w}{\tau_c} \cdot 100\% \quad (2)$$

где τ_w – время работы компрессора; τ_c – время полного цикла (время работы компрессора + время простоя компрессора).

Коэффициент рабочего времени представляет собой количественную характеристику эффективности эксплуатации технического объекта, определяемую как отношение времени его фактической работы к общей продолжительности рассматриваемого периода. В рамках разработанного алгоритма КРВ (DC) вычисляется в двух взаимодополняющих формах: кумулятивной (накопительной) и событийно-ориентированной (по полным циклам включения-выключения)

В рассматриваемой дискретной последовательности измерений в моменты времени $\tau_1 < \tau_2 < \dots < \tau_N$, где состояние объекта в момент τ_i задано бинарным индикатором $s_i \in \{0,1\}$ (1 – рабочее состояние, 0 – нерабочее). Длительность интервала между соседними измерениями выражается как

$$\Delta\tau = \frac{\tau_{i+1} - \tau_i}{3600}, i = 1, \dots, N - 1 \text{ (в часах)} \quad (3)$$

Рабочий вклад интервала определяется с применением функции-указателя (индикатора) $1_A(x)$:

$$w_i = \Delta\tau_i 1_{\{1\}}(s_i) \quad (4)$$

Накопленное рабочее время W_k и общая длительность периода D_k до момента τ_k выражаются суммами:

$$W_k = \sum_{i=1}^{k-1} w_i, \quad D_k = \sum_{i=1}^{k-1} \Delta\tau_i \quad (5)$$

при этом начальные значения принимаются равными нулю: $W_1 = D_1 = 0$.

Итоговый кумулятивный коэффициент использования оборудования на шаге k определяется следующим образом:

$$DC_k = \begin{cases} 100 \cdot \frac{W_k}{D_k}, & \text{если } D_k > 0 \\ 0, & \text{если } D_k = 0 \end{cases} \quad (6)$$

Для анализа динамики эффективности вводится понятие полного цикла, включающего интервал от момента активации оборудования до момента следующей активации (включая фазу работы и фазу простоя).

Алгоритм выделения циклов реализуется в три этапа:

1. Идентификация событий: Формируется множество индексов включения $J = \{j | s_j - s_{j-1} = 1, j = 2, \dots, N\}$. Если $s_1 = 1$, в множество добавляется индекс $j=1$ (при допущении $s_0 = 0$).

2. Фильтрация: В случае $s_N = 1$ последний цикл исключается из анализа как незавершенный.

3. Параметризация цикла: Для каждого цикла $\ell = 1, \dots, m$ (где $m = |J|$) определяются его границы $[j_\ell, k_\ell]$, длительность D_ℓ и рабочее время W_ℓ .

КРВ (DC) для отдельного цикла ℓ рассчитывается как:

$$DC_\ell = 100 \cdot \frac{W_\ell}{D_\ell} \quad (7)$$

Средняя временная метка цикла, используемая для дальнейшего анализа трендов, вычисляется как $t_\ell^{mid} = (t_{j_\ell} + t_{k_\ell}) / 2$.

Для выявления долгосрочных тенденций изменения эксплуатационных характеристик строится зависимость $\{x_\ell, DC_\ell\}$, где x_ℓ — время в часах от начала наблюдений. Аппроксимация осуществляется по экспоненциальной модели:

$$DC(x) = A \cdot e^{-\beta \cdot x} \quad (8)$$

Качество модели верифицируется через скорректированный коэффициент детерминации R_{adj}^2 , среднеквадратическую

ошибку (RMSE) и критерий Фишера (F -статистика).

Методика интегрирует временные показатели с данными о энергопотреблении. Средневзвешенная мощность оборудования в активном режиме вычисляется как:

$$\bar{N}_{work} = \frac{\sum_{i=1}^{N-1} N_i \cdot w_i}{\sum_{i=1}^{N-1} w_i} \quad (9)$$

Общее потребление электрической энергии за рассматриваемый период (в кВт·ч) определяется путем численного интегрирования мгновенной мощности N_i :

$$E_{кВт\cdotч} = \frac{1}{1000} \sum_{i=1}^{N-1} N_i \cdot \Delta\tau_i \quad (10)$$

эффективности оборудования, позволяя переходить от оперативного контроля к стратегическому планированию технического обслуживания и энергопотребления.

На рисунке 6 представлена динамика КПВ (DC) и потребляемой мощности. Зеленые линии на графике показывают мгновенную мощность компрессора (высокие пики ~70–80 Вт во время работы, нулевые в паузах), образуя "зеленую стену" в переходном режиме и разреженные импульсы в стационарном.

Красная линия коэффициента рабочего времени начинается со ~100% и снижается экспоненциально. Пунктирная линия — тренд КПВ (DC) (сглаженный), подчеркивающий переход от высокой нагрузки к стабильному значению. График охватывает полный цикл: от введения теплой нагрузки до последующего устойчивого хранения.

Предложенный алгоритм обеспечивает многоуровневое представление

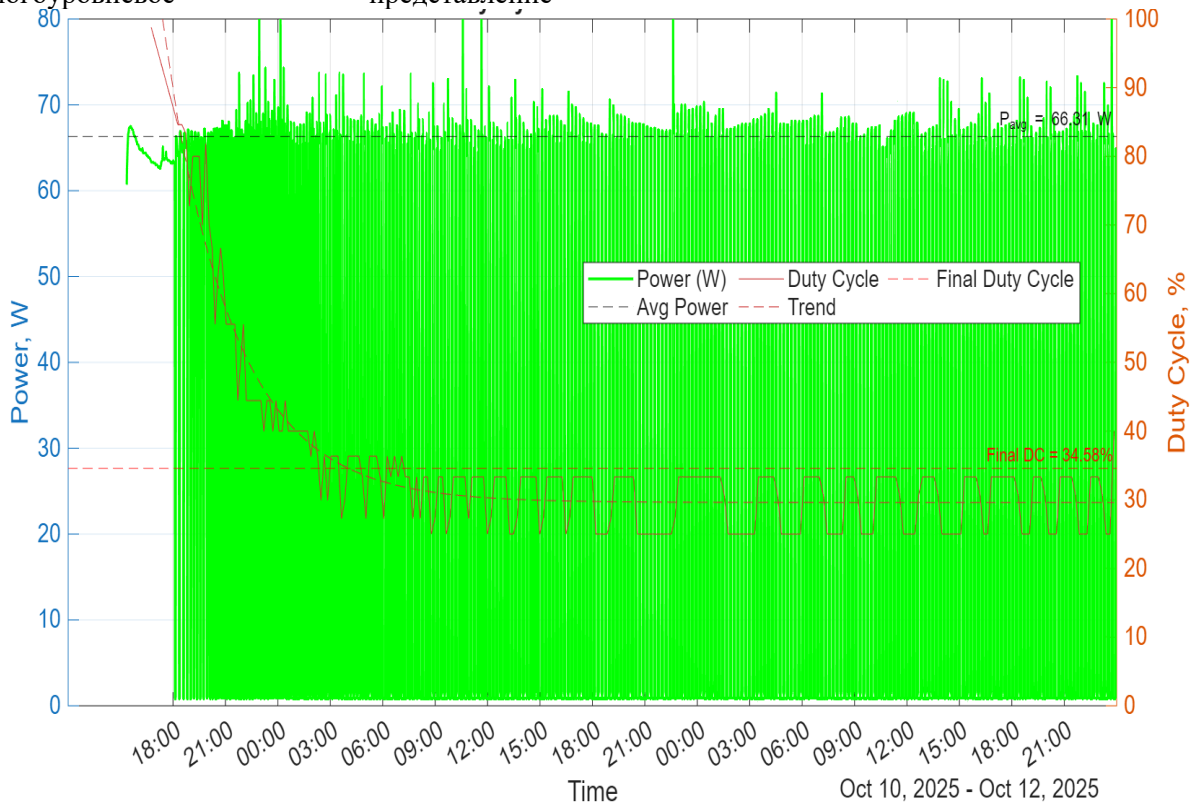


Рис. 5. Сравнение Мощности и КПВ.
Fig.5. Comparison of Power and duty cycle).

Динамика в переходном режиме в период проведения эксперимента 10.10 с 18:00 до 23:00: показывает начальную мощность (~70–80 Вт) с КПВ (DC) ~90–100%, т.е. происходит

почти непрерывная работа компрессора). Это соответствует компенсации тепловой нагрузки от загрузки 500 г продуктов при

+18 °C (плюс теплопритоки от открытой двери).

Циклы включения/выключения компрессора (зеленая линия), образуют сплошную полосу, а КРВ (DC) экспоненциально падает (с ~100% до ~40–50% к 23:00), коррелируя с фазовым переходом в продуктах (отвод скрытой теплоты). Средняя мощность (горизонтальная линия) начинается ~60–70 Вт, но тренд (пунктир) показывает резкий спад, отражая стабилизацию ΔT между воздухом и испарителем.

В стационарном режиме (после 00:00 11.10): КРВ (DC) стабилизируется на уровне ~25–35% (среднее ~30%), с периодическими колебаниями (прямоугольная волна), соответствующими циклам включения/выключения компрессора для поддержания -15°C, а средняя мощность снижается до ~20–30 Вт, указывая на минимальную нагрузку (только компенсация теплопритоков через изоляцию камеры).

Сопоставление КРВ с кинетикой продукта представлено на рисунке 7. Переходный режим (высокий КРВ (DC) ~100%) совпадает с предварительным охлаждением и фазовым переходом продуктов.

Анализ данного графика позволяет сделать вывод, что КРВ (DC) является надежным инструментом контроля процесса замораживания растительных продуктов. Завершение фазового перехода в продукте (выход на стационарный режим) определяется по устойчивому снижению КРВ (DC) до минимального уровня, определенного пороговым значением.

На исследуемых графиках $DC_{es,exp} \approx 30\%$. Момент устойчивого снижения КРВ (DC) ниже 35% наступает около 23:00 – 00:00, что соответствует достижению T_2 близкой к конечной температуре -12 °C ... -14 °C.

Регрессионная модель демонстрирует динамику изменения нагрузки на холодильную систему по мере продвижения фронта кристаллизации, что видно из рис.7.

Текущее значение КРВ(DC) $K(\tau)$ в зависимости от времени τ аппроксимируется следующим выражением:

$$K(\tau) = K_{min} + (K_0 - K_{min}) \cdot e^{-\lambda \tau}, \quad (11)$$

где:

$K(\tau)$ — текущее значение КРВ (DC) в момент времени τ (в процентах или долях);

K_{min} — асимптотический минимум КРВ (DC), представляющий собой теоретический предел при $\tau \rightarrow \infty$;

K_0 — начальное значение КРВ в момент запуска системы ($\tau = 0$);

λ — константа скорости охлаждения, характеризующая инерционность системы (скорость затухания переходного процесса).

Оценка вектора параметров модели $P = [K_{min}, A, \lambda]$ (где $A = K_0 - K_{min}$ — начальный размах переходного процесса) осуществлялась с использованием метода наименьших квадратов. Целевая функция минимизации представляла собой сумму квадратов отклонений экспериментально измеренных (фактических) значений КРВ (DC) от значений, предсказанных моделью:

$$\min_P \sum_{i=1}^n \left[K_{fact,i} - (K_{min} + A \cdot e^{-\lambda \tau_i}) \right]^2, \quad (12)$$

где n — общее количество экспериментальных точек.

Для определения момента выхода системы на установившийся режим охлаждения используется критерий, согласно процесс замораживания считается завершённым, когда система переходит из режима компенсации фазового перехода в режим компенсации внешних теплопритоков. Физически это соответствует моменту, когда КРВ (DC) стабилизируется на минимальном уровне (K_{min}), а САР переходит в режим поддержания квазистационарного состояния. Это соответствует времени τ_{settle} , при котором отклонение функции $K(\tau)$ от асимптотического значения K_{min} составляет не более 5% от начального размаха A :

$$\frac{K(\tau_{settle}) - K_{min}}{K_0 - K_{min}} \leq 0.05 \quad (13)$$

Подстановка выражения (1) в неравенство (3) и решение относительно τ_{settle} приводит к следующей формуле для времени стабилизации:

$$e^{-\lambda \tau_{settle}} = 0.05 \Rightarrow \tau_{settle} = \frac{-\ln(0.05)}{\lambda} \approx \frac{2.9957}{\lambda} \quad (14)$$

Таким образом, время стабилизации системы обратно пропорционально константе скорости охлаждения λ .

Для учета влияния внешних или внутренних термодинамических факторов на установившееся значение КРВ (K_{stable}), была применена линейная статистическая модель, связывающая K_{stable} со средней температурой объекта T_{cp} :

где:

β_0 — свободный член (пересечение);

β_1 — коэффициент наклона, который интерпретируется как термодинамическая чувствительность системы, показывающая изменение КРВ (DC) (в процентах) при изменении температуры на 1 К; δ — случайная ошибка модели.

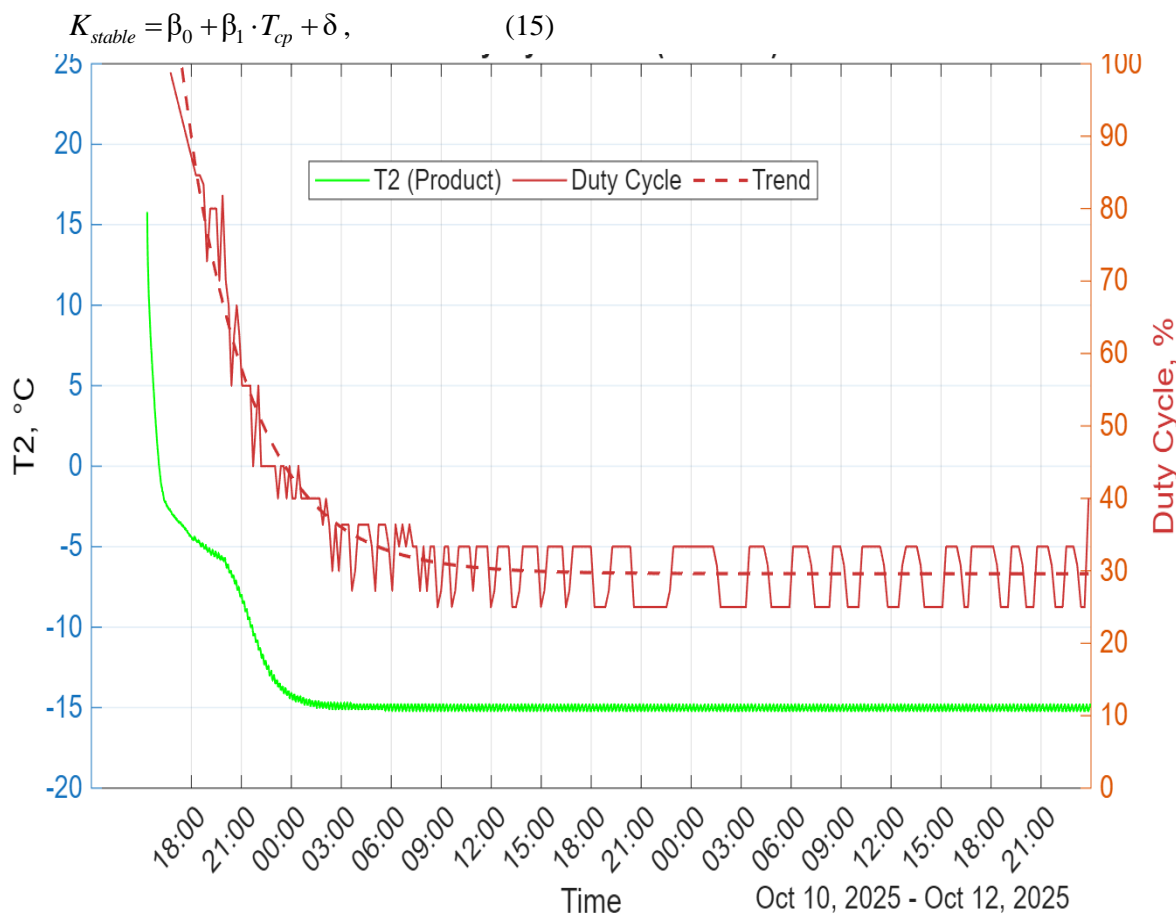


Рис. 6 Динамика изменения коэффициента рабочего времени (DC) в процессе охлаждения и замораживания яблок (T2).

Fig.6. Dynamics of change in the coefficient of working time (DC) in the process of cooling and freezing apples (T2).

Для количественной оценки надежности прогнозируемых значений КРВ (DC) был рассчитан доверительный интервал. Этот интервал позволяет утверждать, что с заданной вероятностью (обычно 95%) истинное значение КРВ (DC) будет находиться в пределах найденного диапазона.

Доверительный интервал для прогноза \hat{K} при температуре T_{cp} определяется выражением:

$$CI = \hat{K} \pm t_{\alpha/2, n-2} \cdot s_e \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(T_{cp} - \bar{T}_{cp})^2}{\sum_{i=1}^n (T_{cp,i} - \bar{T}_{cp})^2}}, \quad (16)$$

где $t_{\alpha/2, n-2}$ — критическое значение t -распределения Стьюдента для уровня

значимости α и $n-2$ степеней свободы, s_e — стандартная ошибка оценки, n — количество наблюдений, \bar{T}_{cp} — среднее значение температуры объекта в выборке.

Таким образом, анализ эксперимента подтверждает, что возможно минимизировать энергопотребление при замораживании растительных продуктов с переводом холодильного оборудования в экономичный режим. Под «экономичным режимом» понимается режим хранения, характеризующийся минимальной скважностью включений компрессора при данной частоте включения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В проведенных экспериментах установлено, что кинетика замораживания в первую очередь определяется удельной скрытой теплотой кристаллизации (q_{f_prod}). Более низкое q_{f_prod} клюквы обеспечило более быстрое прохождение фазового перехода.

Внутреннее термическое сопротивление клюквы выше из-за воздушных пор, что подтверждается большим градиентом температур в образце (ΔT). Для целых мелких ягод переохлаждение — естественный и технологически благоприятный фактор, обеспечивающий высокое качество продукта после размораживания [26].

Для тканей яблок, подвергшихся тепловой обработке, выявлено снижение эффективного коэффициента теплопроводности продукта.

Решение задачи энергосбережения является чрезвычайно актуальной задачей для предприятий, потребителей холода [27-30]. Коэффициент рабочего времени компрессора может являться надежным индикатором процесса криоконсервирования растительного продукта. КРВ (DC) — эффективный инструмент мониторинга: его спад от 100% до ~30–35% сигнализирует о завершении активной фазы замораживания (~5–6 часов), коррелируя с отводом ~80% энергии (скрытая теплота). Это позволяет автоматизировать контроль процесса замораживания растительных продуктов (например, через SCADA как Carel BOSSmini), снижая перерасход энергии на 20–30%.

В промышленных условиях предлагается интегрировать КРВ (DC) в IoT-системы для энергосбережения при замораживании растительных продуктов и перевода

оборудования с режима «замораживание» в режим «хранение».

Дальнейшие исследования по анализу КРВ (DC) компрессора на ход процесса замораживания будут проведены для других видов продуктов, а также апробированы на промышленных установках с отслеживанием КРВ (DC) в реальном времени.

Разработка методики косвенного контроля процесса замораживания через штатные системы автоматизации без использования инвазивных датчиков позволяет оптимизировать алгоритмы управления и снижать энергозатраты в системах хладоснабжения.

Библиография (References)

- [1] Fikiin, K.A. Emerging and Novel Freezing Processes. In Evans, J.A. (Ed.), *Frozen Food Science and Technology*, 2008, (ch.5, pp. 101–123). Blackwell Publishing (Oxford). <https://doi.org/10.1002/9781444302325.ch5>
- [2] Burak, L.Ch., Sapach, A.N., & Pesarik, M.I. Influence of ultrasound on freezing and the quality of frozen fruits and vegetables, *Journal of International Academy of Refrigeration*, 2024, 1, 71–78. <https://doi.org/10.17586/1606-4313-2024-23-1-71-78> (In Russian).
- [3] Korotkiy, I., Neverov, E., Gorelkina, A., Korotkaya, E., & Zadesenets, A. The dehydrator parameters for convective drying of food products. *BIO Web of Conferences*, 2023, 64, 01023. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20236401023>
- [4] Rumiantceva O., Fikiin K., Kiprushkina E., Baranov I., Mironova D., Nikitin A., Nikitina V., Pashkova E., Vassilev M., Goncharenko A. Quality Assessment of Dehydrofrozen Berries Produced by Microwave-Vacuum Dehydration and Subsequent Freezing. *Food and Bioprocess Technology*, 2025, Vol. 18, No. 7, pp. 6612–6620. doi: 10.1007/s11947-025-03835-4
- [5] Wiktor, A., Nowacka, M., Anuszewska, A., Sledz, M., & Rybak, K. Drying kinetics and quality of dehydrated cranberries pretreated by traditional and innovative techniques, *Journal of Food Science*, 2019, Vol. 84, № 11. P. 3208–3217.
- [6] Liu, C., Komatsu, T., Lopez-Moreno, H., Mura, J., Zalapa, J., & Ikeda, S. Internal structure, density, and mechanical properties of cranberry fruits, *Journal of Food Science*,

- 2025, 90, e70153.
<https://doi.org/10.1111/1750-3841.70153>
- [7] Bai, Y., Rahman, M. S., Perera, C. O., & Smith, B. State diagram of apple slices: glass transition and freezing curves, *Journal of Food Research International*, 2001, Vol. 34, № 10. P. 857–865.
- [8] Singh, R. P., & Heldman, D. R. Introduction to Food Engineering, 2001, 3rd ed. San Diego: Academic Press. 760 p.
- [9] Cleland, A. C., & Earle, R. L. The original Plank equation and its use in the development of food freezing rate predictions. *Journal of Food Engineering*, 2002,. Vol. 55, № 3. P. 185–192.
- [10] Baloha, S., Buletsa, S., Ivanytsky, V., Kovtunenکو, V., Legeta, J., Meshko, R., Ryaboshchuk, M. Defining ways for improving automatic technological lines for shock freezing of food products. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2025, 6 (2 (138)), 84–93. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.347796>
- [11] Sun, D. W. Advances in food refrigeration, *International Journal of Refrigeration*, 2021, Vol. 127. P. 1–3.
- [12] Xian, M., Bi, J., Hu, L., Xie, Y., Zhao, Y., & Jin, X. Synergistic mechanism of steam blanching and freezing conditions on the texture of frozen yellow peaches based on macroscopic and microscopic properties. *Journal of Texture Studies*, 2024,. 55(2), e12830. <https://doi.org/10.1111/jtxs.12830>
- [13] Tatarenko J.V., Mitropov V.V., Nikitin A.A., Ryabova T.V., Muraveinikov S.S. Comparative operation of pharmaceutical refrigerator cabinets. *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda*, 2020, DOI: 10.17586/1606-4313-2020-19-1-12-21 No 1. p. 12-21 (In Russian).
- [14] Krokida, M. K., & Saravacos, G. D. Effect of pretreatment on quality of freeze-dried fruits and vegetables, *Drying Technology*, 2001, Vol. 19, № 5. P. 893–902.
- [15] Initial Freezing Point: ASHRAE Handbook—Fundamentals. 2017, Chapter 11: Thermophysical Properties of Foodstuffs. Atlanta: ASHRAE.
- [16] Sweat, V. E. Experimental values of thermal conductivity of selected foodstuffs, *Journal of Food Science.*, 1974,. Vol. 39, № 6. P. 1080–1083.
- [17] Latent Heat: WFLO Commodity Storage Manual, 2018,. Cranberries Section. Alexandria: World Food Logistics Organization. 22nd ed.
- [18] Martin, R. C., & Lopez, V. V. Modelling supercooling in frozen strawberries: Experimental analysis, cellular automation and inverse problem methodology, *International Journal of Refrigeration*, 2020, Vol. 110. P. 10–18.
- [19] Ramaswamy, H. S., & Tung, M. A. Thermophysical properties of apples in relation to freezing. *Journal of Food Science*, 1981, Vol. 46, № 3. P. 724–728.
- [20] Pham, Q. T. Simplified equation for predicting the thermal conductivity of frozen foods, *Journal of Food Science*, 1986, Vol. 51, № 3. P. 556–559.
- [21] Fellows, P. Food Processing Technology: Principles and Practice, 2017, 4th ed. Duxford: Woodhead Publishing. 1200 p.
- [22] Specific Heat and Latent Heat: ASAE Standards D245.5 // Moisture Relationships and Properties of Materials.
- [23] Choi, Y., & Okos, M. R. Effects of temperature and composition on the thermal properties of foods, *Food Engineering*, 1986. Applications. Amsterdam: Elsevier. P. 93–108.
- [24] Xiong, Xuefeng & Cao, Xuehui & Xu, Xiangling & Zhuo, Qiuchen. The Effects of Water Migration on Fresh Food Freezing Processing. *Food Engineering Reviews*, 2025, 17. 905-926. 10.1007/s12393-025-09412-x.
- [25] HOO, A.F. & McLellan, Mark. The Contributing Effect of Apple Pectin on the Freezing Point Depression of Apple Juice Concentrates. *Journal of Food Science.*, 2006, 52. 372 - 374. 10.1111/j.1365-2621.1987.tb06616.x.
- [26] Taylor, Timothy & Heldman, Dennis & Chao, Roy & Kramer, Heather. Measurement of Kinetic Parameters for Quality Change During Food Freezing, ASME 1994 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 2025, 81-90. 10.1115/IMECE1994-0323.
- [27] Muraveinikov, S. S., et al. "Average annual efficiency evaluation in the design of life support systems." AIP conference proceedings, 2019, Vol. 2141. No. 1. AIP Publishing LLC
- [28] Tsoy A.P., Baranenko A.V., Granovsky A., Tsoy D.A., Dzhamasheva R. Energy efficiency analysis of a combined cooling system with night radiative cooling//AIP

Conference Proceedings, 2020, Vol. 2285, pp. 030018

[29] Hossain, Md & Mondal, Dr-Dipayan & Ahammed, Md. Cooling Load Analysis of a Household Refrigeration System: Evaluating the Impact of Compressor Efficiency. SciEn Conference Series: Engineering, 2025, 3. 616-621. 10.38032/scse.2025.3.156.

[30] Deymi-Dashtebayaz, Mahdi & Sulin, A. & Ryabova, Tanya & Sankina, Yulia & Сведения об авторах.

Farahnak, Mehdi & Nazeri, Reza. Energy, exergoeconomic and environmental optimization of a cascade refrigeration system using different low GWP refrigerants. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2021, 9. 106473. 10.1016/j.jece.2021.106473.



Митропов Владимир Викторович
Университет ИТМО, доцент к.т.н.
Область научных интересов: энергоэффективное холодильное оборудование
ORCID: 0000-0003-1614-7392
E-mail: vvmitropov@itmo.ru



Шульган Кира Андреевна, Университет ИТМО, аспирант 1 курса, факультет экотехнологий
Область научных интересов: экологические аспекты низкотемпературных технологий
ORCID: 0009-0005-4368-9439
E-mail: shulgan.kira.29@gmail.com



Румянцева Ольга Николаевна
Университет ИТМО, доцент к.т.н.
Область научных интересов: холодильные технологии пищевых продуктов
ORCID: 0000-0003-2032-6617
E-mail: rumyantseva@itmo.ru



Сигунов Ростислав Владимирович, аспирант.
Область научных интересов: энергоэффективное холодильное оборудование
ORCID: 0009-0007-1729-7516
E-mail: s.rost.6000@gmail.com



Плужникова Дарья Владимировна
Университет ИТМО, инженер межфакультетской лаборатории
Область научных интересов: теплофизические процессы и измерения
ORCID: 0000-0002-2368-413X
E-mail: dvpluzhnikova@itmo.ru



Шейн Владислав Максимович, к.т.н., старший преподаватель, ОЦ «Энергоэффективные инженерные системы» Университета ИТМО,
Область научных интересов: теплофизические свойства веществ, процессы сложного теплообмена
ORCID: 0000-0002-0777-651X
E-mail: ymshein@itmo.ru



Полонская Мария Сергеевна
Университет ИТМО, магистрант 1 курса, ОЦ «Энергоэффективные инженерные системы»
Область научных интересов: холодильная техника
ORCID: 0009-0000-8108-4813
E-mail: mashveidery@inbox.ru