

Игорь Алексеевич Короткий^{1✉}, Александр Николаевич Расщепкин²,
Елена Валерьевна Короткая³, Людмила Владимировна Лифенцева⁴

^{1,2,3,4}Кемеровский государственный университет, Кемерово, Россия

¹krot69@mail.ru

²technoholod@mail.ru

³lena_short@mail.ru

⁴milka61-08@mail.ru

ОПТИМИЗАЦИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЗАТРАТ РЕЖИМА ФЛЮИДИЗАЦИИ ПРИ ЗАМОРАЖИВАНИИ ПЛОДОВ ИРГИ

Цель исследования – оптимизация энергетических затрат режима флюидизации при замораживании плодов ирги. Задачи: создание методики расчета энергетических затрат, необходимых для организации режима флюидизации плодов в воздушном флюидизационном аппарате; определение критических скоростей флюидизации при замораживании плодов ирги при различных температурных режимах низкотемпературной обработки; определение рабочего диапазона скоростей флюидизации в скороморозильном аппарате, обеспечивающего возникновение псевдооживленного слоя и исключающего унос плодов из рабочей зоны при замораживании ирги; определение диапазона скоростей движения воздуха при флюидизационном замораживании, обеспечивающий минимальный уровень энергетических затрат при реализации процесса. При решении задачи оптимизации этих параметров использовались теория подобия и критериальные уравнения теплообмена в условиях принудительной конвекции. Приводятся уравнения для определения аэродинамического сопротивления псевдооживленного слоя, границ режима флюидизации с критическими скоростями w' , w'' , количества энергии (L_a), необходимой для обеспечения циркуляции требуемого количества воздуха с заданной скоростью. Представлены графики продолжительности замораживания плодов ирги при различных режимах низкотемпературной обработки, что позволяет оптимизировать процесс и обеспечивает высокую эффективность замораживания продукции. Определены затраты энергии на создание и поддержание режима флюидизации в рабочей зоне скороморозильного аппарата для замораживания плодов ирги в зависимости от скорости и температуры воздушной среды. Результаты расчетов указывают, что оптимальная скорость движения воздуха в температурном диапазоне от минус 20 °С до минус 45 °С, при которой энергетические затраты на организацию режима флюидизации в рабочей зоне скороморозильного аппарата будут минимальны, составляет 6 м/с.

Ключевые слова: плоды ирги, флюидизация, быстрое замораживание, скороморозильный аппарат, псевдооживленный слой, скорость замораживания, продолжительность замораживания, низкотемпературная обработка, аэродинамическое сопротивление, шоковая заморозка

Для цитирования: Оптимизация энергетических затрат режима флюидизации при замораживании плодов ирги / И.А. Короткий [и др.] // Вестник КрасГАУ. 2024. № 11. С. 183–192. DOI: 10.36718/1819-4036-2024-11-183-192.

Igor Alekseevich Korotkiy^{1✉}, Alexander Nikolaevich Raschepkin², Elena Valerievna Korotkaya³, Lyudmila Vladimirovna Lifentseva⁴

^{1,2,3,4}Kemerovo State University, Kemerovo, Russia

¹krot69@mail.ru

²technoholod@mail.ru

³lena_short@mail.ru

⁴milka61-08@mail.ru

OPTIMIZATION OF FLUIDIZATION MODE ENERGY COSTS WHEN FREEZING SERVICEBERRY FRUITS

The objective of the study is to optimize the energy costs of the fluidization mode when freezing serviceberry. Tasks: to create a methodology for calculating the energy costs required to organize the fruit fluidization mode in an air fluidization apparatus; to determine the critical fluidization rates when freezing serviceberry at different temperature modes of low-temperature processing; to determine the operating range of fluidization rates in a quick-freezing apparatus, ensuring the formation of a pseudo-fluidized layer and eliminating the carryover of fruits from the working area when freezing serviceberry; to determine the range of air movement rates during fluidization freezing, ensuring the minimum level of energy costs during the process. When solving the problem of optimizing these parameters, the similarity theory and criterial equations of heat exchange under forced convection conditions were used. The paper presents equations for determining the aerodynamic resistance of a fluidized bed, the boundaries of the fluidization mode with critical speeds w' , w'' , and the amount of energy (L_a) required to ensure the circulation of the required amount of air at a given speed. Graphs of the duration of freezing of serviceberry under various low-temperature processing modes are presented, which allows optimizing the process and ensures high efficiency of freezing products. The energy costs for creating and maintaining the fluidization mode in the working area of a quick-freezing apparatus for freezing serviceberry are determined depending on the speed and temperature of the air environment. The calculation results indicate that the optimal air velocity in the temperature range from minus 20 °C to minus 45 °C, at which the energy costs for organizing the fluidization mode in the working area of the quick-freezing apparatus will be minimal, is 6 m/s.

Keywords: serviceberry fruits, fluidization, rapid freezing, quick-freezing apparatus, fluidized bed, freezing speed, freezing duration, low-temperature treatment, aerodynamic resistance, shock freezing

For citation: Optimization of fluidization mode energy costs when freezing serviceberry fruits / I.A. Korotkiy [et al.] // Bulliten KrasSAU. 2024;(11): 183–192 (In Russ.). DOI: 10.36718/1819-4036-2024-11-183-192.

Введение. Ирга обыкновенная представляет собой крупный многоствольный ягодный кустарник. Относится к семейству розоцветных и подсемейству яблоневых. Ирга достаточно неприхотлива, что обуславливает ее популярность в зонах сурового и умеренного климата. Урожайность ирги составляет до 15 кг плодов с одного куста за сезон.

В Сибири распространена ирга канадская. Плоды ирги обладают комплексом биологически активных веществ. Содержание сахаров достигает 14 %, кислотность – 0,5–0,9 %. Пектиновые вещества составляют 0,8–1,0 %, дубильные и красящие – 0,9 %.

Достаточно богаты плоды ирги витаминами С (37–61 мг%), В (60–150 мг%), провитамином А

(0,2 мг%), кумаринами и оксикумаринами (гликозидированные формы, 1,4–3,7 мг%). В плодах содержатся фолиевая кислота (0,05 мг%), флавоноиды (антоцианы, лейкоантоцианы, 1 %), бетаин (300–980 мг%), ситостерин, а также микроэлементы – медь, железо, кобальт, йод и особенно много марганца [1, 2].

Наличие комплекса биологически активных веществ в плодах ирги обеспечивает их лечебное действие в профилактике, устойчивость к различным заболеваниям. Кумарины и оксикумарины (гликозидированные формы) в плодах ирги обладают противоязвенным, бактерицидным и противоопухолевым действием. Р-активные соединения выносят из организма ионы тяжелых металлов, нормализуют проницае-

мость капилляров, предупреждают свертываемость крови и обладают антигеморрагическим действием [3].

Поскольку в Западной Сибири имеется достаточная сырьевая база высокоценного продукта – ирги, изучение возможности использования данных плодов для их заготовки и низкотемпературного консервирования представляет большой практический интерес [4].

Замораживание является оптимальным способом длительного хранения плодов ирги, при этом быстрое замораживание позволяет наилучшим образом сохранить ценные компоненты и структуру плодов [5].

Оптимальным с точки зрения технической реализации процесса, а также сохранения товарного вида и органолептических характеристик плодов является флюидизационное замораживание [6]. При этом необходимо иметь в виду, что размер плодов ирги редко превышает 1,2 см, к тому же содержание воды в них составляет порядка 82 %, поэтому плоды ирги обладают подверженной механическим повреждениям структурой.

Флюидизационное замораживание является достаточно энергоемким процессом, поскольку требуется не только создать условия для эффективного теплоотвода от объекта замораживания при низких температурах, но и обеспечить эффективную циркуляцию и теплообмен больших объемов воздуха в ограниченном пространстве скороморозильного аппарата [7]. Это эффективный метод низкотемпературной обработки агропромышленного сырья, поскольку позволяет наилучшим образом сохранить качественные характеристики продукта. Важным преимуществом этого метода также является равномерное охлаждение и замораживание того продукта, низкотемпературная обработка которого производится.

Проектирование процессов низкотемпературной обработки во флюидизационных скороморозильных аппаратах является комплексной задачей, требующей учета различных факторов, имеющих разнонаправленное влияние на процесс [8]. Одним из ключевых аспектов при таком проектировании является анализ и оптимизация условий замораживания при различных режимах низкотемпературной обработки.

Цель исследования – оптимизация энергетических затрат режима флюидизации при замораживании плодов ирги.

Задачи: создание методики расчета энергетических затрат, необходимых для организации режима флюидизации плодов в воздушном флюидизационном аппарате; определение критических скоростей флюидизации при замораживании плодов ирги при различных температурных режимах низкотемпературной обработки, рабочего диапазона скоростей флюидизации в скороморозильном аппарате, обеспечивающего возникновение псевдооживленного слоя и исключающего унос плодов из рабочей зоны при замораживании ирги, диапазона скоростей движения воздуха при флюидизационном замораживании, обеспечивающего минимальный уровень энергетических затрат при реализации процесса.

Объекты и методы. Для проектирования процессов быстрого замораживания плодов ирги необходимо задаться массогабаритными показателями сырья. На основании статистических исследований плодов сорта ирга канадская, собранной в Кемеровской области, урожая 2021–2022 гг. определены следующие средние значения: масса единичного плода – 0,7 г; плотность продукта – 1024 кг/м³; насыпная плотность плодов – 719 кг/м³; пористость слоя – 0,303; диаметр единичного плода – 11 мм. Необходимо отметить, что отличия различных плодов от границы режима флюидизации задаются критическими скоростями w' , w'' [9].

Первая критическая скорость w' характеризует начало левитации плодов в потоке проходящего через них воздуха и определяется как функция кинематической вязкости воздуха (ν_a , м²/с) и диаметра плода (d , м):

$$w' = \frac{\nu_a}{d} \times \frac{Ar}{1400 + 5,22\sqrt{Ar}} \quad (1)$$

Критерий Архимеда (Ar), определяемый через соотношение плотностей продукта (ρ_{np} , кг/м³) и проходящего через него воздуха (ρ_a , кг/м³), вычисляется по формуле

$$Ar = \frac{g \cdot d \cdot \rho_{np}}{v_a^2 \cdot \rho_a}, \quad (2)$$

где g – ускорение свободного падения.

Вторая критическая скорость движения воздуха w'' характеризует скорость, при которой возможен унос плодов из рабочей зоны аппарата:

$$w'' = \frac{v_a}{d} \cdot \frac{Ar}{18 + 0,6 \cdot \sqrt{Ar}}. \quad (3)$$

Продолжительность замораживания плодов ирги с достаточно высокой точностью можно определить по формуле Планка [10]. Для продуктов сферической формы диаметром d (м), как раз соответствующей плодам ирги, формула Планка учитывает коэффициент теплоотдачи от продукта к воздуху (α , $Вт/(м^2 \cdot К)$), теплопроводность замороженной части продукта (λ_3 , $Вт/(м \cdot К)$), плотность продукта (ρ_{np} , $кг/м^3$) и удельную теплоту, отводимую от продукта в процессе замораживания (q_3 , $Дж/кг$):

$$\tau_3 = \frac{q_3 \cdot \rho_{np}}{t_{кр} - t_a} \cdot \frac{d}{6} \left(\frac{d}{4\lambda_3} + \frac{1}{\alpha} \right), \quad (4)$$

где $t_{кр}$ – криоскопическая температура продукта, °С.

Коэффициент теплоотдачи α можно представить как функцию критерия Нуссельта (Nu), теплопроводности воздуха (λ_a) и диаметра продукта (d) по формуле

$$\alpha = Nu \cdot \lambda_a / d. \quad (5)$$

Критерий Нуссельта для теплоотдачи при флюидизации зависит от критериев Прандтля Pr и Рейнольдса Re и определяется по уравнению

$$Nu = 0,03 \cdot Pr^{1/3} \cdot Re. \quad (6)$$

Критерий Прандтля, в свою очередь, зависит от параметров воздуха – динамической вязкости (μ_a , $Па \cdot с$), удельной величины изобарной теп-

лоемкости (c_p , $Дж/(кг \cdot К)$) и теплопроводности (λ_a):

$$Pr = \mu_a c_p / \lambda_a. \quad (7)$$

Критерий Рейнольдса определяется динамическими характеристиками воздушного потока – скоростью (ω , $м/с$), плотностью (ρ_a , $кг/м^3$), динамической вязкостью (μ_a) и диаметром продукта (d):

$$Re = \omega \cdot d \cdot \rho_a / \mu_a. \quad (8)$$

Теплота, отводимая при воздушном замораживании от ягоды, передается воздуху, поэтому при расчете процесса низкотемпературной обработки необходимо рассчитать количество воздуха (m_a , $кг$), способное воспринять эту теплоту [11].

Определить количество воздуха для замораживания килограмма плодов можно по формуле

$$m_a = \frac{\Delta h}{c_p \cdot \Delta t_a}, \quad (9)$$

где Δh – разность энтальпий плодов при изменении их температуры от 10 до -18 °С, $Дж/кг$; Δt_a – изменение температуры воздуха после теплового взаимодействия с продуктом, $К$.

Изменение энтальпии плодов при замораживании в заданном температурном диапазоне определяется исходя из известного компонентного состава ягод [12], а также из теплоты фазового перехода влаги, присутствующей в плодах ирги. Δh соответствует произведению коэффициента теплоотдачи α от плода к воздуху, площади поверхности плода F_{np} и среднелогарифмической разности температуры Δt_m :

$$\Delta h = \alpha \cdot F_{np} \cdot \Delta t_m. \quad (10)$$

Среднелогарифмическая разность температур определяется по формуле

$$\Delta t_m = \frac{t_{\epsilon 2} - t_{\epsilon 1}}{\ln \frac{t_{кр} - t_{\epsilon 1}}{t_{кр} - t_{\epsilon 2}}}, \quad (11)$$

где $t_{\epsilon 1}$ – температура воздуха на входе в рабочую зону; $t_{\epsilon 2}$ – температура воздуха на выходе из рабочей зоны; $t_{кр}$ – криоскопическая температура плодов [12].

Температура воздуха на выходе из рабочей зоны определяется методом последовательных приближений из формулы [13].

Объем воздуха V_a , соответствующий требуемой массе, определенной по формуле (9), определяется по формуле

$$V_a = m_a / \rho_a. \quad (12)$$

Количество энергии (L_a), необходимое для обеспечения циркуляции требуемого количества воздуха с заданной скоростью, определяется по формуле

$$L_a = V_a \cdot \Delta P / \eta_{\epsilon} \quad (13)$$

где η_{ϵ} – КПД вентилятора; ΔP – аэродинамическое сопротивление системы циркуляции воздуха.

Наибольшая величина потерь в аэродинамическом контуре имеет место в псевдооживленном слое, сетчатом поддоне для замораживаемых плодов, а также в оребренных секциях испарителя [14]. Потери давления в других элементах аэродинамического контура относительно невелики, поэтому их можно учесть аэродинамическим КПД вентилятора [15].

Аэродинамическое сопротивление псевдооживленного слоя (ΔP_{ϕ} , Па) зависит от характеристик потока воздуха и параметров продукта, определяется по формуле

$$\Delta P_{\phi} = 1,67 \left(Re \frac{H_c}{d} \right)^{0,2} \cdot \frac{G_n}{F_n}, \quad (14)$$

где H_c – высота псевдооживленного слоя, м; F_n – площадь, занимаемая плодами на сетчатом поддоне, m^2 ; G_n – масса плодов на сетчатом поддоне.

Высота псевдооживленного слоя определяется по формуле

$$H_c = H_0 \left(\frac{1 - \epsilon_0}{1 - \epsilon} \right), \quad (15)$$

где H_0 – высота слоя продукта на поддоне до режима флюидизации, м; ϵ_0 – пористость плодов;

$\epsilon = \left(\frac{18Re + 0,36Re^2}{Ar} \right)^{0,21}$ – пористость

плодов в режиме флюидизации.

Аэродинамическое сопротивление сетчатого поддона (ΔP_n , Па) определяется по эмпирической формуле

$$\Delta P_n = 13,72 \cdot w^2 - 43,12 \cdot w + 119,36, \quad (16)$$

где w – скорость потока воздуха, м/с.

Аэродинамическое сопротивление оребренной секции испарителя (ΔP_u , Па) находится по формуле

$$\Delta P_u = 1,35 \cdot A \cdot Re^{-0,24} \rho_a \cdot w^2, \quad (17)$$

где A – коэффициент, учитывающий характеристики секции испарителя.

Гидравлическое сопротивление аэродинамического контура определяется как сумма значимых аэродинамических сопротивлений с учетом дополнительно возникающих сопротивлений, расчет которых не производился, $\xi = 1,1$:

$$\Delta P = \xi (\Delta P_{\phi} + \Delta P_n + \Delta P_u). \quad (18)$$

Результаты и их обсуждение. Результаты определения критических скоростей флюидизации, рассчитанные по формулам (1)–(3), для плодов ирги, представлены на графике (рис. 1).

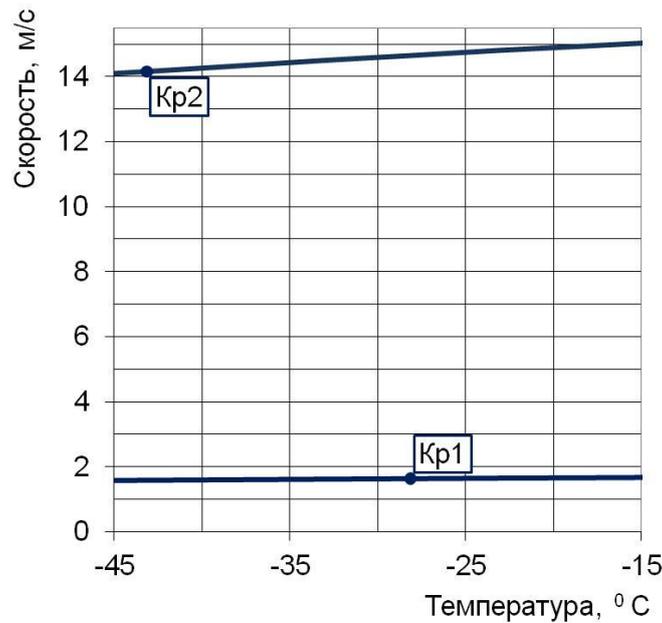


Рис. 1. График зависимости критических скоростей флюидизации w' ($Kp1$) и w'' ($Kp2$) для плодов ирги от температуры воздуха t

Диапазон скоростей воздуха, в котором имеет место флюидизация, в рабочей зоне аппарата составляет от 1,6 до 15,1 м/с в диапазоне температур воздуха $-45\dots-15$ °C.

С учетом индивидуальных характеристик отдельных плодов определен диапазон скоростей, который рекомендован для быстрого замораживания плодов ирги в скороморозильном аппарате воздушного типа. Диапазон скоростей воздуха, гарантирующий возникновение эффекта флюи-

дизации и исключающий унос плодов из рабочей зоны, для плодов ирги составляет 2,2–12 м/с.

Расчет продолжительности замораживания плодов ирги при различных режимах низкотемпературной обработки позволяет оптимизировать процесс и обеспечить высокую эффективность замораживания продукции [16]. Результаты расчетов, выполненных по формулам (4)–(8), представлены на графике (рис. 2).

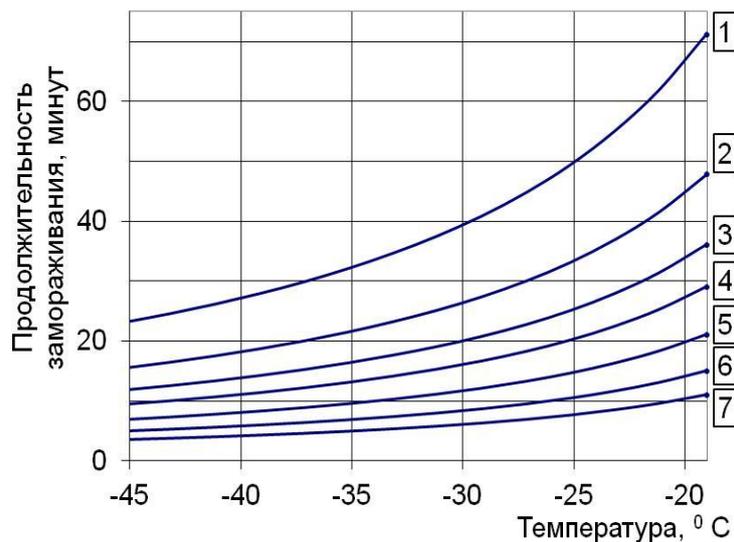


Рис. 2. Продолжительность замораживания плодов ирги при скорости движения воздуха: 1 – 2 м/с; 2 – 3; 3 – 4; 4 – 5; 5 – 7; 6 – 10; 7 – 14 м/с

С помощью формул (9)–(18) были определены затраты энергии на создание и поддержание режима флюидизации в рабочей зоне скороморозильного аппарата для замораживания ягод ирги в зависимости от скорости и температуры

воздушной среды. Начальная температура ягоды (t_n) составляла 10 °С, конечная температура замораживаемой ягоды (t_k) – минус 18 °С. Полученные зависимости приведены на рисунке 3.

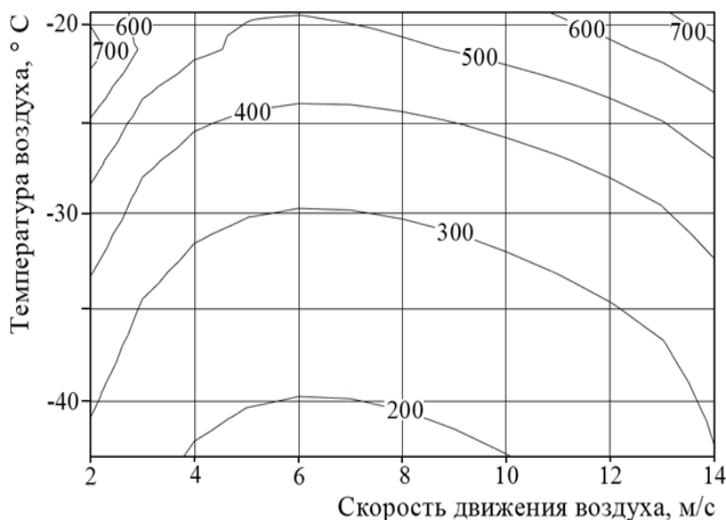


Рис. 3. Удельные затраты энергии (кДж/кг), требуемые для обеспечения режима флюидизации в скороморозильном аппарате при замораживании плодов ирги от начальной температуры плодов 10 °С до конечной среднеобъемной температуры плода –18 °С

Результаты расчетов свидетельствуют, что для ягод ирги диапазон скоростей флюидизации, в котором энергозатраты на обеспечение циркуляции воздуха в скороморозильном аппарате минимальны, составляет 6–7 м/с.

Заключение. Увеличение скорости движения воздуха в псевдооживленном слое интенсифицирует теплообмен, уменьшает продолжительность замораживания ягоды и таким образом уменьшает расход энергии на обеспечение режима флюидизации. При этом с увеличением скорости движения растут пропорционально квадрату скорости аэродинамические потери в циркуляционном контуре скороморозильного аппарата. В этом контексте увеличение скорости движения воздушной среды увеличивает энергетические затраты на организацию движения воздушной среды. Соответственно при относительно малых скоростях увеличение скорости движения воздуха уменьшает удельные энергетические затраты, требуемые для замораживания ягоды. При относительно высоких скоростях движения воздуха увеличение энергетических затрат, необходимое для компенса-

ции возрастающих аэродинамических потерь, превышает положительный эффект от увеличения эффективности теплообмена при низкотемпературной обработке ягоды.

Результаты расчетов свидетельствуют, что для ягод ирги диапазон скоростей флюидизации, в котором энергозатраты на обеспечение циркуляции воздуха в скороморозильном аппарате минимальны, составляет (6 ± 0,5) м/с.

Список источников

1. Короткий И.А. Сибирская ягода. Физико-химические основы технологий низкотемпературного консервирования / Кемеров. технол. ин-т пищевой промышленности (ун-т). Кемерово, 2007. 146 с.
2. Величко Н.А., Машанов А.И. Химический состав плодов ирги круглолистной и разработка рецептуры алкогольного напитка на ее основе // Вестник КрасГАУ. 2019. № 2 (143). С. 135–138. EDN YZSYEP.
3. Лаксаева Е.А. Плоды растений рода ирги (*Amelanchier medic*) как источник биологиче-

- чески активных веществ и минералов // Российский медико-биологический вестник имени академика И.П. Павлова. 2018. Т. 26, № 2. С. 296–304. DOI: 10.23888/PAVLOVJ 2018262296-304.
4. Перспективы разработки нектаров функционального назначения на основе плодово-ягодного сырья Сибирского региона / М.С. Куракин [и др.] // Ползуновский вестник. 2020. № 2. С. 93–99. DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2020.02.018.
 5. Исследование процесса замораживания и размораживания плодовых соков / В.Ю. Овсянников [и др.] // Вестник Международной академии холода. 2015. № 3. С. 23–27. EDN ULPOJF.
 6. *Короткий И.А.* Исследование влияния режимов замораживания и низкотемпературного хранения на качественные показатели ягод черной смородины // Вестник КрасГАУ. 2008. № 2. С. 291–294. EDN ISDFVT.
 7. *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.
 8. *Венгер К.П., Цибульских В.Е.* Экспериментальные исследования процесса флюидизации при замораживании растительной продукции в низкотемпературном воздушном потоке // Вестник науки. 2020. Т. 5, № 5 (26). С. 213–219. EDN OWQRMS.
 9. *Остроумов Л.А., Буянов О.Н., Короткий И.А.* Исследование процессов замораживания плодов и ягод // Техника и технология пищевых производств. 2009. № 1 (12). С. 32–36. EDN KUFVHB.
 10. *Korotkiy I.A.* Analysis of the energy efficiency of the fast freezing of blackcurrant berries // Foods and Raw Materials. 2014. Vol. 2, № 2. P. 3–14. DOI: 10.12737/5454.
 11. Определение режимов замораживания пищевых продуктов / Н.С. Николаев [и др.] // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2020. Т. 82, № 2 (84). С. 17–24. DOI: 10.20914/2310-1202-2020-2-17-24.
 12. *Короткий И.А., Сахабутдинова Г.Ф., Ибрагимов М.И.* Определение теплофизических свойств компонентов плодовоовощной смеси в процессе замораживания // Техника и технология пищевых производств. 2016. № 1 (40). С. 81–86. EDN VRDJDB.
 13. Методика определения криоскопической температуры для различных плодов и ягод / И.А. Короткий [и др.] // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2022. № 2 (66). С. 202–208. DOI: 10.32786/2071-9485-2022-02-26.
 14. *Грибов Д.И.* Технологический расчет инновационного флюидизационного скороморозильного аппарата для плодовоовощной продукции // Холодильная техника. 2020. № 5. С. 30–33. EDN OKNIZA.
 15. Определение режимов замораживания пищевых продуктов / Н.С. Николаев [и др.] // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2020. Т. 82, № 2 (84). С. 17–24. DOI: 10.20914/2310-1202-2020-2-17-24.
 16. *Короткий И.А., Расщепкин А.Н.* Энергетическая эффективность низкотемпературных систем // Молочная промышленность. 2023. № 2. С. 54–57. DOI: 10.31515/1019-8946-2023-02-54-57.

References

1. *Korotkiy I.A.* Sibirskaya yagoda. Fiziko-himicheskie osnovy tehnologij nizkotemperaturnogo konservirovaniya / Kemerov. tehnol. in-t pischevoj promyshlennosti (un-t). Kemerovo, 2007. 146 s.
2. *Velichko N.A., Mashanov A.I.* Himicheskij sostav plodov irgi kruglolistnoj i razrabotka receptury alkohol'nogo napitka na ee osnove // Vestnik KrasGAU. 2019. № 2 (143). S. 135–138. EDN YZSYEP.
3. *Laksaeva E.A.* Plody rastenij roda irgi (*Ame-lanchier medic*) kak istochnik biologicheskij aktivnyh veschestv i mineralov // Rossijskij mediko-biologicheskij vestnik imeni akademika I.P. Pavlova. 2018. Т. 26, № 2. S. 296–304. DOI: 10.23888/PAVLOVJ 2018262296-304.

4. Perspektivy razrabotki nektarov funkcional'nogo naznacheniya na osnove plodovo-yagodnogo syr'ya Sibirskogo regiona / M.S. Kurakin [i dr.] // Polzunovskij vestnik. 2020. № 2. S. 93–99. DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2020.02.018.
5. Issledovanie processa zamorazhivaniya i razmorazhivaniya plodovyh sokov / V.Yu. Ovsyannikov [i dr.] // Vestnik Mezhdunarodnoj akademii holoda. 2015. № 3. S. 23–27. EDN ULPOJF.
6. Korotkij I.A. Issledovanie vliyaniya rezhimov zamorazhivaniya i nizkotemperaturnogo hraniya na kachestvennye pokazateli yagod chernoj smorodiny // Vestnik KrasGAU. 2008. № 2. S. 291–294. EDN ISDFVT.
7. Kolodyaznaya V.S., Rumyancheva O.N., Kiprushkina E.I. Istoriya i perspektivy razvitiya holodil'noj tehnologii pischevyh produktov // Vestnik Mezhdunarodnoj akademii holoda. 2023. № 1. S. 47–54. DOI: 10.17586/1606-4313-2023-22-1-47-54.
8. Venger K.P., Cibul'skih V.E. `Eksperimental'nye issledovaniya processa flyuidizacii pri zamorazhivanii rastitel'noj produkcii v nizkotemperaturnom vozdušnom potoke // Vestnik nauki. 2020. T. 5, № 5 (26). S. 213–219. EDN OWQRMS.
9. Ostroumov L.A., Buyanov O.N., Korotkij I.A. Issledovanie processov zamorazhivaniya plodov i yagod // Tehnika i tehnologiya pischevyh proizvodstv. 2009. № 1 (12). S. 32–36. EDN KUFVHB.
10. Korotkiy I.A. Analysis of the energy efficiency of the fast freezing of blackcurrant berries // Foods and Raw Materials. 2014. Vol. 2, № 2. P. 3–14. DOI: 10.12737/5454.
11. Opredelenie rezhimov zamorazhivaniya pischevyh produktov / N.S. Nikolaev [i dr.] // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inženernykh tehnologij. 2020. T. 82, № 2 (84). S. 17–24. DOI: 10.20914/ 2310-1202-2020-2-17-24.
12. Korotkij I.A., Sahabutdinova G.F., Ibragimov M.I. Opredelenie teplofizicheskih svojstv komponentov plodoovoschnoj smesi v processe zamorazhivaniya // Tehnika i tehnologiya pischevyh proizvodstv. 2016. № 1 (40). S. 81–86. EDN VRDJDB.
13. Metodika opredeleniya krioskopicheskoj temperatury dlya razlichnyh plodov i yagod / I.A. Korotkij [i dr.] // Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professional'noe obrazovanie. 2022. № 2 (66). S. 202–208. DOI: 10.32786/2071-9485-2022-02-26.
14. Gribov D.I. Tehnologicheskij raschet innovacionnogo flyuidizacionnogo skoromorozil'nogo apparata dlya plodoovoschnoj produkcii // Holodil'naya tehnika. 2020. № 5. S. 30–33. EDN OKNIZA.
15. Opredelenie rezhimov zamorazhivaniya pischevyh produktov / N.S. Nikolaev [i dr.] // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inženernykh tehnologij. 2020. T. 82, № 2 (84). S. 17–24. DOI: 10.20914/ 2310-1202-2020-2-17-24.
16. Korotkij I.A., Rasshepkin A.N. `Energeticheskaya `effektivnost' nizkotemperaturnykh sistem // Molochnaya promyshlennost'. 2023. № 2. S. 54–57. DOI: 10.31515/1019-8946-2023-02-54-57.

Статья принята к публикации 28.10.2024 / The paper accepted for publication 28.10.2024.

Информация об авторах:

Игорь Алексеевич Короткий¹, профессор, заведующий кафедрой теплохладотехники, доктор технических наук, профессор

Александр Николаевич Расщепкин², профессор кафедры теплохладотехники, доктор технических наук, доцент

Елена Валерьевна Короткая³, профессор кафедры общей и неорганической химии, доктор технических наук, профессор

Людмила Владимировна Лифенцева⁴, доцент кафедры теплохладотехники, кандидат технических наук, доцент

Data on authors:

Igor Alekseevich Korotkiy¹, Head of the Department of Heat and Cooling Engineering, Doctor of Technical Sciences, Professor

Alexander Nikolaevich Raschepkin², Professor at the Department of Heat and Cooling Engineering, Doctor of Technical Sciences, Docent

Elena Valerievna Korotkaya³, Professor at the Department of General and Inorganic Chemistry, Doctor of Technical Sciences, Professor

Lyudmila Vladimirovna Lifentseva⁴, Associate Professor at the Department of Heat and Cooling Engineering, Candidate of Technical Sciences, Docent

