

Разработка рационального режима охлаждения в производстве молочного сахара

¹ Вологодская государственная академия имени Н.В. Верещагина, г. Вологда, Российская Федерация

² Федеральное бюджетное учреждение здравоохранения «Центр гигиены и эпидемиологии в Вологодской области», г. Вологда, Российская Федерация

В.А. Шохалов¹, А.И. Гнездилова¹, Ю.В. Виноградова¹,
В.Н. Шохалова²

КОРРЕСПОНДЕНЦИЯ:

Владимир Алексеевич Шохалов
E-mail: v_shohalov@mail.ru

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Шохалов, В.А., Гнездилова, А.И., Виноградова, Ю.В., & Шохалова, В.Н. (2025). Разработка рационального режима охлаждения в производстве молочного сахара. *Хранение и переработка сельхозсырья*, 33(3), 22-37. <https://doi.org/10.36107/spfp.2025.3.595>

ПОСТУПИЛА: 10.02.2025

ПРИНЯТА: 15.09.2025

ОПУБЛИКОВАНА: 30.09.2025

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

авторы сообщают об отсутствии конфликта интересов.



АННОТАЦИЯ

Введение: Кристаллизация лактозы является ключевым этапом производства молочного сахара, определяющим выход и качество продукта. Процесс реализуется при охлаждении кристаллизата и сопровождается значительными потерями лактозы (70–75 % общих потерь). На практике режимы охлаждения подбираются эмпирически и не опираются на количественные зависимости, описывающие кинетику кристаллизации и изменение пересыщения, что приводит к повышенным потерям и неоднородности кристаллов.

Цель: Разработать теоретически обоснованный режим охлаждения кристаллизата на основе математической модели скорости охлаждения, учитывающей кинетику кристаллизации лактозы и зависимость её растворимости от температуры, и экспериментально верифицировать предложенный режим в полупромышленных условиях.

Материалы и методы: Объектом исследования был процесс кристаллизации лактозы в сгущённом ультрафильтрате подсырной сыворотки с массовой долей сухих веществ 55–60 %. Анализировали кристаллизат, кристаллы и межкристалльный раствор (меласса). Массовую долю сухих веществ определяли рефрактометром RL-3, содержание лактозы – поляриметрически по ГОСТ Р 54667. Средний размер кристаллов и гранулометрический состав оценивали микроскопическим методом в соответствии с ГОСТ 33567; опыты проводили в трехкратной повторности. Теоретическая часть включала аналитический вывод уравнения скорости охлаждения на основе кинетики кристаллизации и математического моделирования.

Результаты: Установлено, что технологические параметры кристаллизата при охлаждении должны быть согласованы с условиями роста кристаллов и должны исключать образование новых центров, что достигается при соответствии скорости охлаждения скорости кристаллизации пересыщенного раствора. Получено уравнение для скорости охлаждения, учитывающее скорость кристаллизации лактозы, массовую долю сухих веществ и кристаллов, коэффициенты насыщения и пересыщения. На основе этого уравнения разработан режим поэтапного снижения скорости и температуры. Его применение позволило увеличить средний размер кристаллов до 275,5 мкм (на 39 % выше контроля), коэффициент однородности – до 0,79 (на 11,3 % выше), снизить потери лактозы в мелассе на 7,5 % и повысить выход кристаллов до 41,3 % (на 8 % выше контроля). Режим апробирован в экспериментальном цехе АО «Учебно-опытный молочный завод Вологодской ГМХА».

Выводы: Полученные результаты создают основу для научно обоснованного выбора температурно-временных параметров кристаллизации при масштабировании процесса до промышленных условий.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

молочный сахар; лактоза; кристаллизация лактозы; режим охлаждения; пересыщенный раствор; гранулометрический состав кристаллов

Development of a rational cooling regime in milk sugar production

¹ Vologda State Dairy Farming Academy named after N.V. Vereshchagin, Vologda, Russian Federation

² The Vologda State Center of Hygieneology of Epidemiology, Vologda, Russian Federation

Vladimir A. Shokhalov¹, Anna I. Gnezdilova¹, Yulia V. Vinogradova¹, Veronika N. Shokhalova²

CORRESPONDENCE:

Vladimir A. Shokhalov

E-mail: v_shohalov@mail.ru

FOR CITATIONS:

Shokhalov V.A., Gnezdilova A.I., Vinogradova Yu.V., & Shokhalova V. N. (2025). Development of a rational cooling regime in milk sugar production. *Storage and Processing of Farm Products*, 33(3), 22-37. <https://doi.org/10.36107/spfp.2025.3.595>

RECEIVED: 10.02.2025

ACCEPTED: 15.09.2025

PUBLISHED: 30.09.2025

DECLARATION OF COMPETING

INTEREST: none declared.



ABSTRACT

Introduction: Lactose crystallization is a key stage in milk sugar production, determining both yield and product quality. It takes place during cooling of the crystallizate and is associated with substantial lactose losses (70–75 % of total process losses). In industrial practice, cooling regimes are mainly selected empirically and are not based on quantitative relationships describing crystallization kinetics and changes in supersaturation, which leads to increased losses and non-uniform crystal size.

Purpose: To develop a theoretically justified cooling regime for the crystallizate based on a mathematical model of the cooling rate that accounts for lactose crystallization kinetics and the temperature dependence of lactose solubility, and to experimentally verify the proposed regime under pilot-scale conditions.

Materials and Methods: The object of the study was lactose crystallization in concentrated ultrafiltrate of cheese whey with a total solids content of 55–60 %. The crystallizate, crystals, and intercrystalline solution (mother liquor) obtained after centrifugation were analysed. Total solids in the syrup and mother liquor were determined using an RL-3 refractometer; lactose content was measured polarimetrically according to GOST R 54667. The mean crystal size and particle size distribution were assessed microscopically according to GOST 33567 using an OLYMPUS CX31 microscope and ToupView software; all experiments were performed in triplicate. The theoretical part included the analytical derivation of a cooling rate equation based on lactose crystallization kinetics and mathematical modelling.

Results: It was shown that the technological parameters of the crystallizate during cooling must be aligned with crystal growth conditions and prevent the formation of new nuclei, which is achieved when the cooling rate matches the crystallization rate of the supersaturated solution. An equation for the cooling rate was obtained that incorporates lactose crystallization rate, mass fractions of total solids and crystals, and saturation and supersaturation coefficients, and on this basis a stepwise cooling regime (in terms of both rate and temperature) was developed. Its application increased the mean crystal size to 275.5 µm (39% above the control), the uniformity coefficient to 0.79 (11.3% above the control), reduced lactose losses in the mother liquor by 7.5 %, and increased crystal yield to 41.3 % (8 % above the control). The regime was tested in the experimental plant of JSC "Training and Experimental Dairy Plant of Vologda State Dairy Farming Academy".

Conclusion: The results provide a basis for a scientifically grounded choice of time–temperature parameters of lactose crystallization when scaling the process up to industrial conditions.

KEYWORDS

milk sugar; lactose; lactose crystallization; cooling regime; supersaturated solution; crystal size distribution

ВВЕДЕНИЕ

Молочный сахар (лактоза) является востребованным ингредиентом в пищевой, фармацевтической, медицинской, микробиологической и ряде других отраслей промышленности. В то же время объемы его производства в России за последние годы существенно сократились, что обусловило выраженную зависимость от импорта: ежегодный ввоз лактозы составляет около 17 тыс. тонн на сумму порядка 3,2 млрд руб.¹ Данные обстоятельства подчеркивают необходимость наращивания российского производства молочного сахара на основе современных научно обоснованных технологических решений.

Ключевым этапом технологической схемы получения молочного сахара является кристаллизация лактозы при охлаждении сиропа, определяющая как выход, так и качество готового продукта. На данном этапе фиксируются значительные потери лактозы, составляющие 70–75 % общих потерь в процессе производства (Halfwerk et al., 2023). Кристаллизация лактозы представляет собой сложный двухстадийный процесс, включающий зародышеобразование и рост кристаллов (Wong, 1988; Goulart, 2021). Определяющими факторами, влияющими на параметры кристаллизации, являются степень пересыщения раствора, гидродинамические условия (перемешивание) и наличие примесей. Повышенное пересыщение интенсифицирует зародышеобразование и приводит к формированию большого количества мелких кристаллов, часто сопровождается их агломерацией и ухудшением потребительских характеристик продукта (Agrawal et al., 2017). Поддержание оптимального уровня пересыщения, напротив, способствует формированию крупных кристаллов с однородной формой и гранулометрическим составом. Существенное влияние на процесс оказывают также pH, температура и режим механического перемешивания (Schoen, 1961; Chandrapala et al., 2017).

Дополнительную сложность процессу кристаллизации придает неизбежное присутствие в сырье так называемых несахаров: сывороточных белков, минеральных солей, органических и неорганических кислот и других компонентов. Эти примеси взаимодействуют с лактозой, изменяют её раствори-

мость и замедляют кристаллизацию, способствуя образованию мелассы и увеличению потерь лактозы в межкристалльной жидкости. Белковые компоненты и гелеобразующие структуры не только повышают растворимость лактозы и снижают скорость её кристаллизации, но и изменяют морфологию кристаллов, препятствуя их росту (Nasirpour et al., 2006; Heffels et al., 1987; Paterson, 2017; Haque & Roos, 2004; Miao & Roos, 2006). Минеральные соли оказывают разнонаправленное действие: например, хлорид лития ускоряет рост кристаллов, тогда как дифосфат калия его тормозит (Bhargava & Jelen, 1996).

Анализ литературных данных позволяет выделить ряд ключевых причин повышенных потерь лактозы на этапе кристаллизации. Во-первых, несмотря на то, что пересыщение является основным параметром, определяющим скорость кристаллизации, размер, форму и качество кристаллов (Gänzle et al., 2008; Holsinger, 1988), оно практически не учитывается при разработке промышленных режимов охлаждения кристаллизата. Это приводит к неконтролируемому росту кристаллов, их неравномерному гранулометрическому составу, агломерации и затруднениям при разделении кристаллизата в процессе центрифугирования. Во-вторых, при выборе режимов кристаллизации, как правило, не учитывается влияние примесей на растворимость лактозы и, следовательно, на величину пересыщения и скорость кристаллообразования, что обуславливает возрастание потерь в мелассе (Гнездилова, 2019; Goulart & Hartel, 2017; Червецов & Гнездилова, 2011; Ang et al., 2017; Шохалов и соавт., 2024). Из изложенного следует, что при проектировании промышленных режимов охлаждения кристаллизата необходимо количественно учитывать основные параметры процесса кристаллизации: уровень пересыщения, скорость кристаллизации лактозы и модифицирующее влияние примесей.

В промышленной практике в настоящее время применяются два традиционных режима охлаждения при кристаллизации лактозы: медленный и ускоренный. Медленный режим предполагает длительность охлаждения 20–25 ч, при этом в течение первых 7–10 ч используется естественное охлаждение, после чего осуществляется принудительное охлаждение со скоростью 2–3 °С/ч. Ускоренный режим

¹ Как создавался первый цех лактозы в России. <https://www.dairynews.ru/news/kak-sozdavalsya-pervyy-tsekh-laktozy-v-rossii.html>

рассчитан на 10–12 ч с использованием скорости охлаждения 4,5–5,5 °С/ч, как правило, при доброкачественности сиропа выше 85 % (Храмцов и соавт., 2021; Володин и соавт., 2025). Однако теоретическое и экспериментальное обоснование данных режимов в литературе не представлено, что ставит под сомнение их оптимальность с точки зрения потерь лактозы и качества кристаллов.

Дополнительной проблемой является отсутствие научно обоснованных нормативов потерь лактозы в мелассе. Действующие технологические инструкции допускают потери на уровне 18–22 %, не учитывая при этом мелассообразующую способность нес сахаров, зависящую от типа сырья, региона и сезона. В свеклосахарном производстве проблема нормирования потерь решается с учетом состава насыщенных меласс (Грибкова и соавт., 2024; Решетова & Баранов, 2023). Применение аналогичного подхода к производству молочного сахара может повысить точность оценки потерь и эффективность процесса.

Рассматриваемые в литературе режимы и способы проведения промышленной кристаллизации лактозы остаются преимущественно эмпирическими и не опираются на теоретически рассчитанные параметры кристаллизации. Современные исследования авторов (Фиалкова и соавт., 2024а; Фиалкова и соавт., 2024б; Гнездилова и соавт., 2023; Шохалов и соавт., 2025) направлены, главным образом, на уточнение механизма кристаллообразования, расчет скорости кристаллизации лактозы и определение предельных пересыщений на границе метастабильности. Полученные ими результаты заложили основу для разработки теоретически и экспериментально обоснованной модели оптимального режима охлаждения кристаллизата в производстве молочного сахара.

Несмотря на наличие многочисленных эмпирически апробированных схем охлаждения, в доступной литературе отсутствуют модели, позволяющие количественно увязать скорость охлаждения с кинетикой роста кристаллов и изменением концентрации пересыщенного раствора по температурным интервалам, что затрудняет масштабирование и целенаправленную оптимизацию процесса кристаллизации. В этой связи целью настоящего исследования стала разработка теоретически обоснованного режима охлаждения кристаллизата на основе

кинетики кристаллизации лактозы и зависимости её растворимости от температуры с последующей экспериментальной верификацией в полупромышленных условиях.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ

Влияние пересыщения на формирование кристаллической фазы для различных областей пересыщения: лабильной, металабильной, стабильной

Основным параметром, определяющим процесс кристаллизации является пересыщение, точнее коэффициент пересыщения, который определяется как отношение концентрации пересыщенного раствора $H_{\text{пер}}$ к насыщенному $H_{\text{н}}$ при той же температуре:

$$K_{\text{п}} = \frac{H_{\text{пер}}}{H_{\text{н}}}. \quad (1)$$

Концентрация насыщения (растворимость) определяется при равновесном состоянии системы и зависит не только от температуры, но и от примесей (несахаров), которые всегда присутствуют в технических растворах, такие как белки, соли, органические и неорганические кислоты и др.

Для оценки растворимости используется коэффициент насыщения, который определяется из отношения растворимости лактозы в присутствии нес сахаров — $H_{\text{н}}$ к растворимости в воде — H_0 :

$$K_{\text{п}} = \frac{H_{\text{н}}}{H_0}. \quad (2)$$

Поддержание оптимального уровня пересыщения способствует росту крупных кристаллов с однородной формой. Таким образом, контроль пересыщения имеет решающее значение для формирования кристаллов с желаемыми размерами и формой.

Известно, что раствор может находиться в трех состояниях: стабильном, метастабильном и лабильном (Рисунок 1).

Стабильная область характеризует состояние раствора, при котором его концентрация равна или ниже равновесной. Метастабильное состояние

можно разделить на две области. Первая метастабильная область находится между кривой равновесной концентрации 1 и кривой 2, отвечающей некой предельной концентрации, ниже которой гомогенное зародышеобразование центров кристаллизации невозможно. Вторая метастабильная область находится между кривыми 2 и 3, в этой зоне образование зародышей происходит спонтанно, но через некоторый промежуток времени, названный индукционным периодом кристаллизации.

Время нахождения раствора в метастабильном состоянии зависит от устойчивости раствора и характеризуется такими параметрами, как ширина метастабильной зоны и время пребывания раствора в неравновесном состоянии без видимых изменений. Ширина метастабильной зоны может быть выражена через абсолютное значение как разность между предельной и равновесной концентрациями. Время нахождения раствора в метастабильном состоянии равно времени индукционного периода (τ_{ind}).

Поскольку образование новой фазы наступает при первом предельном пересыщении, то представляет большой интерес именно методы его определения. В частности, для этого может быть

использован метод построения зависимостей продолжительности индукционных периодов от коэффициента пересыщения: $\tau_{ind} = f(K_{пер})$ с последующей экстраполяцией их в область бесконечности $\tau_{ind} \rightarrow \infty$.

Этот метод был использован для экспериментального определения значений предельных пересыщений при различных температурах в системе H_2O —лактоза. Было определено оптимальное пересыщение 1,15–1,20.

Влияние скорости охлаждения на величину пересыщения и скорость кристаллизации

Для поддержания оптимального уровня пересыщения необходимо, чтобы скорость охлаждения находилась в соответствии со скоростью кристаллизации лактозы. При этих условиях пересыщение, которое будет создаваться за счет переохлаждения, будет снижаться до оптимального за счет кристаллизации. В основе модели лежит предположение о том, что скорость кристаллизации лимитирует выход и качество кристаллов за счет регулирования скорости охлаждения.

В процессе кристаллизации лактозы происходит уменьшение её концентрации в пересыщенном растворе $H_{пер}$ и понижение температуры t .

С учетом температурной зависимости растворимости лактозы в воде (выражение в скобках), а также коэффициентов насыщения K_n и пересыщения $K_{п}$, была выражена концентрация пересыщения $H_t = H_{пер}$, кг/кг воды (3) в зависимости от температуры t , °C и скорости её изменения $\frac{dH_{пер}}{dt}$ (4), т. е. скорость кристаллизации в зависимости от скорости охлаждения $\frac{dt}{d\tau}$:

$$H_{пнр} = (0,1325 + 6,75 \cdot 10^{-4} \cdot t + 1,14 \cdot 10^{-4} \cdot t^2) \times K_{п} \cdot K_n = H_t, \quad (3)$$

$$\frac{dH_{пер}}{dt} = K_n \cdot K_{п} \cdot (6,75 \cdot 10^{-4} + 2,28 \cdot 10^{-4} \cdot t) \cdot \frac{dt}{d\tau}. \quad (4)$$

Выразим из уравнения (4) скорость охлаждения

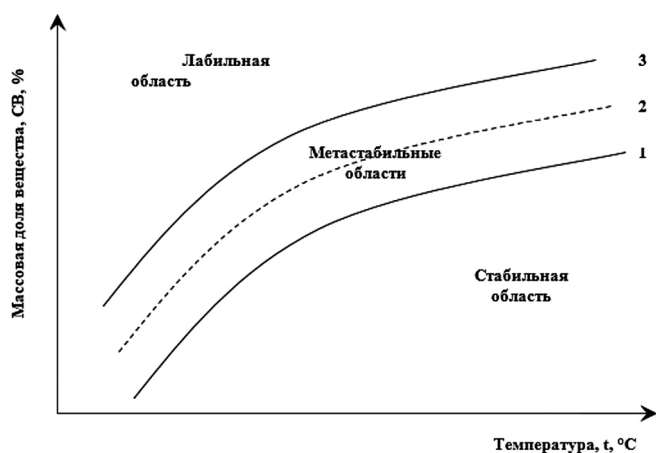
$$W_t = \frac{dt}{d\tau}, \text{ а скорость кристаллизации лактозы}$$

Рисунок 1

Диаграмма состояний раствора

Figure 1

Solution State Diagram



Примечание. 1 — кривая равновесия; 2, 3 — кривые, отвечающие первой и второй границам метастабильности

Note. 1 — equilibrium curve, 2, 3 — first and second boundaries of metastability

обозначим через U , кг/(м² · час) и площадь поверхности кристаллов F_t в 100 кг кристаллизата, м². С учетом того, что кристаллизат включает массовую долю кристаллов K_t , % и межкристальный раствор имеет массовую долю сухих веществ CB_t , %, было получено уравнение для скорости охлаждения:

$$W_t = \frac{100 \cdot U \cdot F_t}{K_H \cdot K_H \cdot (0,000675 + 0,000228 \cdot t) \cdot (100 - CB_t) \cdot (100 - K_t)}. \quad (5)$$

Скорость кристаллизации лактозы, $U \cdot 10^{-4}$ кг/(м²·час) определялась экспериментально. Её зависимость от температуры t была описана уравнением:

$$U = 0,5713 \cdot e^{0,0718t}. \quad (6)$$

Методика расчета скорости охлаждения

Методика расчета скорости охлаждения заключается в следующем. Весь цикл охлаждения разбивают на несколько температурных интервалов Δt и рассчитывают массовую долю сухих веществ CB_t и массовую долю лактозы L_t межкристального раствора, а также линейный размер l_t , и площадь поверхности F_t кристаллов для каждого интервала по уравнениям (7)–(13).

Массовая доля сухих веществ (в %) в зависимости от соотношения «примесь/вода», П/В, кг/кг воды:

$$CB_t = \frac{100 \left(\frac{П}{В} + H_t \right)}{1 + \frac{П}{В} + H_t}. \quad (7)$$

Массовая доля лактозы, %:

$$L_t = CB_t - \frac{П}{В} \cdot (100 - CB_t). \quad (8)$$

Массовая доля кристаллов в зависимости от начальной концентрации пересыщенного раствора $L_{пер}$, %:

$$K_t = \frac{L_{пер} - L_t}{100 - L_t} \cdot 100. \quad (9)$$

Линейный размер кристаллов в зависимости от массы одного кристалла q_t при заданной температуре t , с учетом плотности кристаллов лактозы $\rho = 1545$ кг/м³ и объемного коэффициента формы (Полянский, К. К. & Шестов, А. Г., 1995), м:

$$l_t = \sqrt[3]{\frac{q_t}{\alpha \cdot \rho}}. \quad (10)$$

Масса одного кристалла по интервалам температур Δt , кг:

$$q_{t+\Delta t} = q_t \cdot \frac{K_{t+\Delta t}}{K_t}. \quad (11)$$

Поверхность кристаллов F_t в 100 кг кристаллизата при данной температуре t с учетом поверхностного коэффициента формы $\beta = 2,5$ (Полянский, К. К. & Шестов, А. Г., 1995) определяется по формуле:

$$F_t = \beta \cdot l_t^2 \cdot \frac{K_t}{q_t}. \quad (12)$$

После расчета скорости охлаждения W_t определяется время, необходимое для охлаждения по интервалам температур:

$$\Delta \tau = \frac{\Delta t}{W_t}. \quad (13)$$

Ограничения модели

Модель реализуется в диапазоне температур 10–80 °С и начальных концентраций сухих веществ в сиропе 55–60%, что соответствует производственным условиям проведения кристаллизации. Диапазон коэффициента пересыщения составляет 1,15–1,20 и обоснован экспериментальными исследованиями, приведенными в работе (Гнездилова и соавт., 2023). Гидродинамические условия проведения кристаллизации соответствуют производственным условиям. Кристаллы находятся в условиях слабого перемешивания, осаждения по Стоксу.

Сопоставление с существующими моделями

В отличие от эмпирических схем (Evdokimov et al., 2010; Khrantsov, 2011), предложенная модель учитывает скорость кристаллизации лактозы и изменение концентрации пересыщенных растворов лактозы по интервалам температур в процессе охлаждения. Расчеты опираются на обоснованные экспериментальными исследованиями значения коэффициентов пересыщения и насыщения. Аналогов данному подходу нет.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Дизайн исследования

Исследование выполнено в формате контролируемого лабораторно-полупромышленного эксперимента с элементами расчетного моделирования параметров процесса кристаллизации лактозы.

Материалы и объект исследования

Объектом исследования является процесс кристаллизации лактозы в сгущенном ультрафильтрате (УФ-пермеат) подсырной сыворотки (сиропе) с начальной массовой долей сухих веществ 58%. Предметом исследования являлись кристаллизат, кристаллы и межкристальный раствор (меласса), полученные после центрифугирования. В работе использовалась обезжиренная сладкая сыворотка из коровьего молока, полученная при производстве твердого сыра в экспериментальном цехе АО «Учебно-опытный молочный завод Вологодской ГМХА». Базовый состав сыворотки (диапазоны), %: массовая доля сухих веществ — 4,7–6,8; лактозы — 3,9–4,9; белка — 0,5–1,1; золы — 0,5–0,8; pH — 6,3–6,5; титруемая кислотность — 12–18 °Т.

Методы и инструменты

Подсырная сыворотка направлялась на центробежную очистку от казеиновой пыли и удаления жира сепаратором MS-110. УФ-пермеат получают путем обработки подсырной сыворотки на пилотной УФ-установке фирмы «Протемол», оснащенной полимерной мембраной с массовой долей отсечки 20 кДа, при температуре (40 ± 1) °С и давлении $(7 \pm 0,5)$ бар.

Сгущение УФ-пермеата осуществляют на пилотной вакуум-выпарной установке фирмы CPS производительностью 150 кг/и.в.ч. до концентрации сухих веществ (58 ± 1) %. Затем сироп нагревают до 80 °С с целью полностью растворить лактозу и не допустить спонтанной неуправляемой кристаллизации лактозы. Состав УФ-пермеата после сгущения: массовая доля лактозы — $(55 \pm 0,5)$ %, белок — $2,4 \pm 0,11$ %, зола — $4,1 \pm 0,15$ %; pH — 6,5–7,0.

Для проведения кристаллизации сгущенный УФ-пермеат охлаждают до конечной температуры 10 °С с поэтапным снижением температуры без внесения затравки. По окончании кристаллизации кристаллизат центрифугируют на лабораторной центрифуге при частоте 4000 об/мин.

В сиропе, а также межкристальном растворе определялась массовая доля сухих веществ с помощью рефрактометра RL-3, (PZO, Польша) с погрешностью измерений $\pm 0,1$ %.

Содержание лактозы измерялось на поляриметре Atago AP-300 по ГОСТ Р 54667, обеспечивающем измерение в международных сахарных градусах (°Z) при длине волны $\lambda = 589$ нм с погрешностью измерений $\pm 0,2$ %.

В твердой фазе измерялся средний линейный размер кристаллов с помощью микроскопа OLYMPUS CX31 при стократном оптическом увеличении. Микроскоп был укомплектован цифровой камерой TouPCam U3CMOS18000KPA и программным обеспечением TouPView (Olympus, Япония). Оценка гранулометрического состава осуществлялась из выборки 100 кристаллов микроскопическим методом по ГОСТ 33567² с погрешностью измерений $\pm 2,5$ мкм.

Коэффициент однородности оценивался с помощью кривой интегрального распределения. Численное значение коэффициента однородности соответствует отношению размера кристалла с вероятностью реализации 50% к размеру кристалла с вероятностью реализации 84% (Шохалов и соавт., 2024). Опыты проводились в трехкратной повторности. В теоретическом исследовании использовались методы анализа, дифференцирования и математического моделирования.

Математическая обработка результатов проводилась с помощью пакета прикладных программ Microsoft Office 2019. В основе предложенной модели реализуется подход, согласно которому скорость кристаллизации лимитирует выход и качество кристаллов. Для их повышения необходимо регулирование скорости охлаждения.

² ГОСТ 33567–2015. (2016). *Сахар молочный. Технические условия*. М.: Стандартинформ.

Процедура исследования

Подготовка модельного кристаллизата

Для моделирования условий кристаллизации молочного сахара исходную мелассу подогревали до полного растворения остаточных кристаллов лактозы. После достижения однородного состояния в расплавленную мелассу вносили 10–20% (по массе) кристаллов молочного сахара, выполнявших функцию затравки. Смесь выдерживали при постоянной температуре с непрерывным перемешиванием до получения равномерно распределенной системы «кристаллы — раствор».

Проведение кристаллизации

Кристаллизацию осуществляли при фиксированных температурных режимах: 10, 15 и 20 °С. Продолжительность выдержки при заданной температуре составляла 48 ч. Перемешивание проводили механическим способом с частотой $n = 2$ об/мин, что обеспечивало поддержание взвешенного состояния кристаллов без их интенсивного разрушения. Контроль герметичности системы и поддержание стабильной температуры выполняли с использованием воздушного термостата ТВ-20.

Центрифугирование и аналитические исследования

По завершении процесса кристаллизации твердую фазу отделяли от межкристалльного раствора путем центрифугирования. Полученную мелассу (межкристалльный раствор) хранили в термостате при конечной температуре кристаллизационного процесса до проведения анализа. В межкристалльном растворе определяли массовую долю сухих веществ и содержание лактозы.

Методы обработки данных

Статистическая обработка экспериментальных данных включала расчет основных описательных характеристик (средних значений, стандартных отклонений), построение доверительных интервалов, а также оценку статистической значимости различий с использованием соответствующих критериев достоверности.

Расчет параметров межкристалльного раствора и кристаллов, а также определение скорости и про-

должительности охлаждения в заданных температурных интервалах выполняли с применением пакетов прикладного программного обеспечения Microsoft Office. Обработку и анализ полученных экспериментальных данных осуществляли с использованием программного пакета Statistica 8.0, предназначенного для статистического анализа.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Параметры насыщенных меласс (эксперимент)

Доброкачественность меласс в конце процесса охлаждения должна максимально приближаться к составу насыщенных меласс. Поэтому для объективной оценки потерь лактозы в мелассе экспериментально был определен состав насыщенных меласс: массовая доля сухих веществ, % и лактозы % в зависимости от температуры, а затем была рассчитана доброкачественность (Таблица 1).

Таблица 1

Технологические показатели насыщенных меласс

Table 1

Technological Characteristics of Saturated Molasses

Температура, °С	Массовая доля сухих веществ, CB_n %	Массовая доля лактозы, L_n %	Доброкачественность, $D_{бн} = L_n \cdot 100 / CB_n$, %
10	25,3 ± 0,1	14,3 ± 0,12	56,5
15	25,4 ± 0,1	14,8 ± 0,15	58,3
20	25,5 ± 0,1	15,5 ± 0,15	60,7

Согласно данным Таблицы 1 и с учетом растворимости лактозы в воде и мелассе были рассчитаны коэффициент насыщения и соотношение «примесь/вода», которые представлены в Таблице 2.

Соотношение «примесь/вода» определялось в зависимости от массовой доли сухих веществ CB_n и лактозы L_n в насыщенной мелассе, % (Таблица 1):

$$\frac{П}{В} = \frac{CB_n - L_n}{100 - CB_n}, \text{ кг/кг воды.}$$

Анализ Таблицы 1 показал, что для снижения потерь лактозы в межкристалльной жидкости необходимо

Таблица 2

Коэффициент насыщения и соотношение «примесь/вода»

Table 2

Saturation Factor and Impurity to Water Ratio

Температура, °С	Растворимость лактозы в воде, кг/кг воды, H_0	Растворимость лактозы в мелассе, кг/кг воды, H_t	Коэффициент насыщения, $K_n = \frac{H_t}{H_0}$	Соотношение «примесь/вода», P/V , кг/кг воды
10	0,1507	0,1914	1,270	0,1473
15	0,1710	0,1984	1,160	0,1421
20	0,1919	0,2081	1,084	0,1342

снижать конечную температуру охлаждения. Поэтому был разработан режим охлаждения с 80 до 10 °С.

Расчетные параметры межкристального раствора и параметры кристаллов

По полученным данным Таблиц 1 и 2 были рассчитаны параметры межкристального пересыщенного раствора, а также параметры кристаллов при охлаждении от начальной температуры 80 °С до конечной температуры охлаждения 10 °С (формулы (2)–(10)). Коэффициент пересыщения, обеспечивающий рост кристаллов и практически исключая образование новых центров, как показали опытные исследования, находится в пределах 1,15–1,20 (Гнездилова и соавт., 2023). В расчетах был принят 1,15. Результаты расчетов представлены в Таблицах 3 и 4.

Таблица 3

Параметры межкристального раствора при $K_{пер} = 1,15$, $K_{нас} = 1,270$, $P/V = 0,147$, $t_n = 80$ °С

Table 3

Intercrystalline Solution Parameters, at $K_{per} = 1.15$, $K_{nas} = 1.270$, $P/V = 0.147$, $t_n = 80$ °С

t , °С	H_{0t} , кг/кг	H_t , кг/кг	L_t , %	$СВ_t$, %	$ДБ_t$, %
80	0,9142	1,3352	53,79	59,71	90,09
70	0,7384	1,0784	48,58	55,18	82,60
60	0,5834	0,8521	42,62	49,98	85,27
50	0,4513	0,6591	36,49	44,63	81,76
40	0,3419	0,4993	30,33	39,26	77,25
30	0,2554	0,3729	24,54	34,21	71,73
20	0,1916	0,2798	19,61	29,91	65,56
10	0,1507	0,2200	16,10	26,85	59,96

Примечание. При охлаждении от 80 до 10 °С наблюдалось снижение доброкачественности

Note: When cooling from 80 to 10 °С, a decrease in high quality was observed

Таблица 4

Параметры кристаллов, скорость и продолжительность охлаждения по интервалам температур при $K_{пер} = 1,15$, $K_{нас} = 1,270$, $P/V = 0,147$, $t_n = 80$ °С, $t_k = 10$ °С

Table 4

Crystal Parameters, Cooling Rate and Duration by Temperature Intervals, at $K_{per} = 1.15$, $K_{nas} = 1.270$, $P/V = 0.147$, $t_n = 80$ °С, $t_c = 10$ °С

t , °С	K_t , %	$q_{t+\Delta t}$, 10^{11} , кг	L_t , 10^6 , м	F , м ²	W , град/ч	τ , мин
80–70	10,44	4,64	50,0	1408	12,53	47,40
70–60	19,55	8,67	61,6	2139	10,76	55,77
60–50	27,32	12,13	68,9	2673	7,80	76,95
50–40	33,74	14,98	73,9	3078	5,40	111,17
40–30	38,83	17,24	77,5	3380	3,77	159,24
30–20	42,58	18,90	79,9	3594	2,81	213,90
20–10	44,99	19,97	81,4	3728	2,51	238,64
Общая продолжительность τ , ч						15,49

Примечание. При охлаждении от 80 до 10 °С увеличивалась масса кристаллов с 10,44 до 44,99 %, а также скорость охлаждения с 12,53 до 2,51 град/ч.

Note. When cooling from 80 to 10 °С, the mass of crystals increased from 10.44 to 44.99 %, as well as the cooling rate from 12.53 to 2.51 degrees/hour

Верификация режима охлаждения

Разработанный режим был реализован в полупромышленных условиях. По данным Таблицы 5, доброкачественность межкристального раствора составила 77,5 %, выход кристаллов — 41,3 %, их средний размер — 275,5 мкм и коэффициент однородности — 0,79.

Таблица 5

Сравнительная оценка режимов охлаждения

Table 5

Comparative Evaluation of Cooling Regimes

Параметры	Традиционный режим охлаждения (контрольный)	Разработанный режим охлаждения
Сироп:		
1. Массовая доля сухих веществ, СВ, %	58,0 ± 0,1	58,0 ± 0,1
2. Массовая доля лактозы, Л, %	53,0 ± 0,2	53,0 ± 0,2
3. Доброкачественность, Дб, %	91,4	91,4
Межкристальный раствор:		
1. Массовая доля сухих веществ, СВ, %	32,0 ± 0,1	30,2 ± 0,1
2. Массовая доля лактозы, Л, %	25,3 ± 0,2	23,4 ± 0,2
3. Доброкачественность, Дб, %	79,0	77,5
Кристаллы:		
1. Выход кристаллов, К, %	39,7	41,3
2. Средний размер, l, мкм	170 ± 2,5	275,5 ± 2,5
3. Коэффициент однородности	0,71	0,79

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Целью настоящего исследования было обоснование такого температурного режима охлаждения кристаллизата, при котором скорость охлаждения согласована со скоростью кристаллизации, и тем самым обеспечивает формирование однородных и достаточно крупных кристаллов лактозы. Полученные данные показывают, что режим охлаждения от 80 до 10 °С с убывающей скоростью (от 12,5 до 2,5 °С/ч) позволяет достигнуть выхода кристаллов 41,3% и коэффициента однородности $u = 0,79$, что подтверждает справедливость предложенной теоретической модели и её применимость в промышленных условиях.

Применение убывающей скорости охлаждения приводит к стабилизации пересыщения в ходе кристаллизации, снижая вероятность образования новых центров кристаллообразования и создавая

условия для преимущественного роста уже сформированных кристаллов. В результате формируется более выровненный гранулометрический состав и повышается средний размер кристаллов при сопоставимой длительности процесса. Таким образом, согласование скорости охлаждения с кинетикой кристаллизации позволяет целенаправленно управлять структурой кристаллизата, опираясь на расчетные зависимости, а не на эмпирический подбор режима.

Доброкачественность межкристального раствора в конце процесса, а следовательно, и потери лактозы при снижении конечной температуры охлаждения уменьшаются. При этом величина доброкачественности межкристального раствора в конце процесса приближается к доброкачественности насыщенных меласс, определенной экспериментально (Таблица 1), что свидетельствует о более полном использовании потенциала кристаллообразования и подтверждает эффективность разработанного режима именно в аспекте снижения потерь лактозы с мелассой.

Полученные результаты сопоставимы с данными Храмова и соавт. (2021), где также отмечалась связь между замедлением охлаждения и увеличением доли крупных кристаллов в кристаллизате. В обоих случаях показано, что отказ от чрезмерно интенсивного охлаждения способствует формированию более благоприятных условий для роста кристаллов и улучшения их структурных характеристик. Однако, в отличие от упомянутого исследования, в настоящей работе предложена расчетная модель, позволяющая заранее прогнозировать параметры процесса и подбирать температурно-временной профиль охлаждения не только по технологическим, но и по кинетическим критериям.

Отличие от эмпирических подходов, описанных в работе Evdokimov et al. (2010), заключается в том, что там режим кристаллизации выбирался на основе качественных технологических наблюдений и оценок, тогда как в предлагаемой модели используется количественное согласование скоростей кристаллизации и охлаждения. Это обеспечивает возможность не только описывать уже реализованные режимы, но и проектировать новые, исходя из заданных требований к выходу и однородности кристаллов.

В англоязычной литературе детализированные модели кристаллизации лактозы с расчетом параметров по температурным интервалам, ориентированные на промышленные или полупромышленные условия, практически не представлены. На этом фоне предложенный подход, основанный на явной связи скорости охлаждения с кинетикой роста кристаллов и составом межкристалльного раствора, может рассматриваться как обладающий элементами научной и практической новизны.

Таким образом, проведенное исследование вносит вклад в формирование научно обоснованной базы процессов кристаллизации лактозы, предлагая алгоритм расчета температурного режима охлаждения кристаллизата. Этот алгоритм может быть адаптирован к конкретным свойствам сырья (включая состав нес сахаров и характеристики мелассообразования) и техническим возможностям оборудования, что расширяет возможности целенаправленного управления кристаллизацией в условиях реального производства.

Ограничения исследования

Вместе с тем разработанная модель имеет ряд ограничений. Во-первых, она применима в условиях слабого перемешивания — при осаждении кристаллов в области Стокса; режимы с более интенсивным перемешиванием и измененной гидродинамикой не рассматривались. Во-вторых, влияние пульсаций температуры, колебаний рН и вариаций состава нес сахаров в расчетную схему не включалось, хотя эти факторы потенциально могут оказывать заметное воздействие на кинетику кристаллизации и структуру кристаллов. Указанные аспекты требуют целенаправленного экспериментального и модельного анализа.

Перспективы дальнейших исследований

С учетом обозначенных ограничений представляется целесообразным расширение модели за счет включения динамики зародышеобразования, что позволит более полно описывать ранние стадии кристаллизации и уточнять границы метастабильной области пересыщения. Перспективным направлением также является изучение масштабируемости предложенного режима на уровне про-

мышленных кристаллизаторов объемом более 500 л, включая оценку влияния реальных гидродинамических условий и интеграции модели в системы автоматизированного управления технологическим процессом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование позволило разработать и теоретически обосновать температурно-временной режим охлаждения кристаллизата в производстве молочного сахара, определяемый согласованием скорости охлаждения со скоростью кристаллизации лактозы и учетом температурной зависимости её растворимости. На основе аналитически выведенного уравнения скорости охлаждения, включающего скорость кристаллизации, массовую долю сухих веществ и кристаллов, а также коэффициенты насыщения и пересыщения, был предложен поэтапный режим охлаждения от 80 до 10 °С с убывающей скоростью (примерно от 12,5 до 2,5 °С/ч).

Расчетные данные показали, что реализация такого режима обеспечивает рост доли кристаллов в кристаллизате до 44,99 % и увеличение их линейного размера до $81,4 \cdot 10^{-6}$ м при общей продолжительности цикла около 15,5 ч, что соответствует ведению процесса в метастабильной области пересыщения. Полупромышленная апробация разработанного режима в условиях АО «Учебно-опытный молочный завод Вологодской ГМХА» подтвердила достоверность теоретических предпосылок: получены кристаллы со средним размером 275,5 мкм, коэффициентом однородности 0,79 и выходом 41,3 %, тогда как при традиционном режиме охлаждения эти показатели составляли соответственно: 170 мкм, 0,71 и 39,7 %. Одновременно доброкачественность межкристалльного раствора снизилась с 79,0 до 77,5 %, что свидетельствует о сокращении потерь лактозы в мелассе.

Совокупность полученных теоретических и экспериментальных результатов формирует основу для научно обоснованного выбора температурно-временных параметров кристаллизации при масштабировании процесса до промышленных условий. Разработанная модель может быть использована для оптимизации режимов работы кристаллизаторов, настройки автоматизированных систем

управления и снижения удельных потерь лактозы в межкристальной жидкости. Дальнейшее развитие подхода предполагает учет динамики зародышеобразования, влияния параметров перемешивания и вариаций состава несахаров, а также проверку работоспособности режима на промышленных кристаллизаторах крупного масштаба.

АВТОРСКИЙ ВКЛАД

Владимир Алексеевич Шохалов: концептуализация; проведение исследования; создание рукописи и ее редактирование.

Анна Ивановна Гнездилова: методология; создание черновика рукописи; руководство исследованием.

Юлия Владимировна Виноградова: администрирование данных; визуализация; формальный анализ.

Вероника Николаевна Шохалова: верификация данных; ресурсы.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Vladimir A. Shokhalov: conceptualization; investigation; writing – review and editing.

Anna I. Gnezdilova: methodology; writing – original draft preparation; supervision.

Yulia V. Vinogradova: data curation; visualization; formal analysis.

Veronika N. Shokhalova: data verification; resources.

ЛИТЕРАТУРА

- Гнездилова, А. И. (2019). Технологические аспекты мелассообразования при кристаллизации лактозы. *Молочнохозяйственный вестник*, 4(36), 155–164.
- Гнездилова, А. И., & Виноградова, Ю. В. (2009). Двухступенчатый режим охлаждения консервированных молочных и молокосодержащих продуктов с сахаром. *Хранение и переработка сельхозсырья*, (5), 70–71.
- Гнездилова, А. И., Шохалов, В. А., Виноградова, Ю. В., & Шохалова, В. Н. (2023). Теоретические и практические аспекты процесса кристаллизации лактозы в производстве молочного сахара. *Молочнохозяйственный вестник*, (2), 128–140. https://doi.org/10.52231/2225-4269_2023_2_128
- Володин, Д. Н., Топалов, В. К., Куликова, И. К., Семченко, А. А., Евдокимов, И. А., & Хазов, Д. С. (2025). Современные направления глубокой переработки молочной сыворотки. *Сыроделие и маслоделие*, (2), 4–6.
- Полянский, К. К., & Шестов, А. Г. (1995). *Кристаллизация лактозы: физико-химические основы*. Воронеж: Изд. ВГУ.
- Решетова, Р. С., & Баранов, О. М. (2023). Влияние несахаров сахарной свёклы на технологию и выход сахара. *Сахар*, (8), 30–36. <https://doi.org/10.24412/2413-5518-2023-8-30-36>
- Грибкова, В. А., Семенов, Е. В., & Славянский, А. А. (2024). *Инновационные разработки в области переработки растительного сырья: в сахарном и крахмалопаточном производствах*. М: Русайнс.
- Фиалкова, Е. А., Кузин, А. А., Славоросова, Е. В., Шевчук, В. Б., & Шохалов, В. А. (2024). Интенсификация процесса кристаллизации лактозы из сгущенного нф-концентрата творожной сыворотки. *Хранение и переработка сельхозсырья*, 32(3), 104–118. <https://doi.org/10.36107/spfp.2024.3.549>
- Фиалкова, Е. А., Виноградова, Ю. В., & Баранов, В. И. (2024). К вопросу о механизме роста кристаллов лактозы из пересыщенных водных растворов. *Кристаллография*, 69(4), 720–729. <https://doi.org/10.31857/S0023476124040191>

- Храмцов А. Г., Борисенко А. А., Евдокимов И. А., Борисенко А. А., Брацихин А. А., & Борисенко Л. А. (2021). Эволюция переработки молочной сыворотки: прошлое, настоящее, будущее (Часть 1). *Современная наука и инновации*, (2), 129–139. <https://doi.org/10.37493/2307-910X.2021.2.12>
- Червцов, В. В., & Гнездилова, А. И. (2011). *Интенсификация процессов кристаллизации при производстве молочных продуктов*. М.: Типография Россельхозакадемии.
- Шохалов, В. А., Гнездилова, А. И., & Шохалова, В. Н. (2024). Совершенствование процесса кристаллизации лактозы в производстве молочного сахара. *Молочная промышленность*, (2), 48–52. <https://doi.org/10.21603/1019-8946-2024-2-7>
- Шохалов, В. А., Гнездилова А. И., & Шохалова В. Н. (2025). Скорость кристаллизации лактозы в производстве молочного сахара. *Ползуновский вестник*, (3), 39–44. <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2025.03.006>
- Ang, X., Truong, T., & Bhandari, B. (2017). Effect of carbonation of supersaturated lactose solution on crystallisation behaviour of alpha-lactose monohydrate. *Food Biophysics*, 12(2), 52–59. <https://doi.org/10.1007/s11483-016-9462-3>
- Agrawal, S. G., Paterson, A. T., Jones, J. R., Mcleod, J. S., Bronlund, J., & Bajpai, H. (2017). Secondary nucleation studies on alpha lactose monohydrate under stirred conditions. *International Dairy Journal*, (66), 61–67. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2016.11.004>
- Bhargava, A., & Jelen, P. (1996). Lactose solubility and crystal growth as affected by mineral impurities. *Journal of Food Science*, 61, 180–184. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1996.tb14754.x>
- Chandrapala, J., Gauthier, C., & Vasiljevic, T. (2017). Behaviour of lactose with the presence of lactic acid and Ca as affected by pH. *Journal of Dairy Research*, 84(4), 484–487. <https://doi.org/10.1017/S0022029917000553>
- Goulart, D. B. (2021). Principles of lactose crystallization and rheology of milk protein concentrate. *Research, Society and Development*, 10(15), 1–21. <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v10i15.23028>
- Goulart, D. B., & Hartel, R. W. (2017). Lactose crystallization in milk protein concentrate and its effects on Rheology. *Journal of Food Engineering*, 212, 97–107. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.05.012>
- Gänzle, M. G., Haase, G., & Jelen, P. (2008). Lactose: Crystallization, hydrolysis and value-added derivatives. *International Dairy Journal*, 18, 685–694. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2008.03.003>
- Haque, M. K., & Roos, Y. H. (2004). Water sorption and plasticization behavior of spray-dried lactose/protein mixtures. *Journal of Food Science*, 69, 384–391. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2004.tb17863.x>
- Halfwerk, R., Verdonk, L., Yntema, D., Spronsen, J. V., & Van der Pad, A. (2023). Scaling up continuous eutectic freeze crystallization of lactose from whey permeate: A pilot plant study at sub-zero temperatures. *Food Research International*, 168, 112764. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.112764>
- Heffels S. K., Jong E. J., & Sinke D. J. (1987). Growth rate of small sucrose crystals at 70°C. *Zuckerind*, 112(6), 511–518.
- Holsinger, V. H. (1988). Lactose. In N. P. Wong, R. Jenness, M. Keeney, & E. H. Marth (Eds.), *Fundamentals of dairy chemistry* (3rd ed., pp. 279–342). New York: Springer New York.
- Miao, S., & Roos, Y. H. (2006). Crystallization kinetics and X-ray diffraction of crystals formed in amorphous lactose, trehalose, and lactose/trehalose mixtures. *Journal of Food Science*, 70, 350–358. <http://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2005.tb09976.x>
- Nasirpour, A., Scher, J., Lindner, M., & Desobry, S. (2006). Modeling of lactose crystallization and colour changes in model infant foods. *Journal of Dairy Science*, 89, 2365–2373. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(06\)72309-8](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(06)72309-8)
- Paterson, A. H. J. (2017). Lactose processing: From fundamental understanding to industrial application. *International Dairy Journal*, 67, 80–90. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2016.07.018>
- Schoen, H. M. (1961). Crystallization is a two-step process-nucleation and growth. *Industrial & Engineering Chemistry*, 53, 607–611. <https://doi.org/10.1021/ie50620a018>

- Smykov, I., Gnezdilova, A., Vinogradova, Y., Muzykantova, A., & Lyamina, A. (2019). Cooling curve in production sweetened concentrated milk supplemented with whey: Influence on the size and microstructure of lactose crystals. *Journal Food Science and Technology International*, 25(6), 1–11. <https://doi.org/10.1177/1082013219830494>
- Wong, N. P. (1988) *Fundamentals of dairy chemistry* (3rd. ed.). NewYork: Van Nostrand Reinhold Company.

REFERENCES

- Chervetsov, V. V., & Gnezdilova, A. I. (2011). *Intensification of crystallisation processes in the production of dairy products*. M.: Typography of Rosselkhozakademia. (In Russ.)
- Fialkova E. A., Shevchuk V. B., Gnezdilova A. I., Vinogradova Y. V., & Baronov V. I. (2024). On the mechanism of growth of lactose crystals from supersaturated solutions. *Crystallography Reports*, 69(4), 720–729. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0023476124040191>
- Fialkova, E. A., Kusin, A. A., Slavorosova, E. V., Shevchuk, V. B., & Shohalov, V. A. (2024). Intensification of the lactose crystallization process from condensed NF-curd whey concentrate. *Storage and Processing of Farm Products*, 32(3), 104–118. (In Russ.). <https://doi.org/10.36107/spfp.2024.3.549>
- Gnezdilova, A. I. (2019). Technological aspects of molasses formation during crystallization of lactose. *Dairy Farming Journal*, 4(36), 155–164. (In Russ.)
- Gnezdilova, A. I., & Vinogradova, Y. V. (2009). Two-stage cooling regime for consevated milk and milk-containing products with sugar. *Storage and Processing of Farm Products*, (5), 70–71. (In Russ.)
- Gnezdilova, A. I., Shokhalov, V. A., Vinogradova, Y. V., & Shokhalova, V. N. (2023). Theoretical and practical aspects of lactose crystallization in milk sugar production process. *Dairy Farming Journal*, (2), 128–140. (In Russ.). https://doi.org/10.52231/2225-4269_2023_2_128
- Gribkova, V.A., Semenov, E.V., & Slavyansky, A. A. (2024). *Innovative developments in the field of processing plant raw materials: in sugar and starch production*. M: Rusains. (In Russ.)
- Khramtsov, A. G., Borisenko, A. A., Evdokimov, I. A., Borisenko, A. A., Bratsikhin, A.A., & Borisenko, L.A. (2021). Evolution of whey processing: Past, present, future (Part 1). *Modern Science and Innovations*, (2), 129–139. (In Russ.). <https://doi.org/10.37493/2307-910X.2021.2.12>
- Polyansky, K.K., & Shestov, A.G. (1995). *Crystallisation of lactose: Physicochemical bases*. Voronezh: Izd.VGU. (In Russ.)
- Reshetova, R. S., & Baranov, O. M. (2023). The influence of sugar beet non-sugars on sugar technology and yield. *Sugar*, (8), 30–36. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/2413-5518-2023-8-30-36>
- Shokhalov, V. A., Gnezdilova, A. I., & Shokhalova, V. N. (2024). Improving lactose crystallization in milk sugar production. *Dairy Industry*, (2), 48–52. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/1019-8946-2024-2-7>
- Shokhalov, V.A., Gnezdilova, A. I., & Shokhalova, V. N. (2025). Crystallisation rate of lactose in milk sugar production. *Polzunovskiy vestnik*, (3), 39–44. (In Russ.). <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2025.03.006>
- Volodin, D. N., Topalov, V. K., Kulikova, I. K., Semchenko, A. A., Evdokimov, I. A., & Khazov, D. S. (2025). Deep processing of whey: Modern trends. *Cheese- and Buttermaking*, (2), 4–6.
- Ang, X., Truong, T., & Bhandari, B. (2017). Effect of carbonation of supersaturated lactose solution on crystallisation behaviour of alpha-lactose monohydrate. *Food Biophysics*, 12(2), 52–59. <https://doi.org/10.1007/s11483-016-9462-3>
- Agrawal, S. G., Paterson, A. T., Jones, J. R., Mcleod, J. S., Bronlund, J., & Bajpai, H. (2017). Secondary nucleation studies on alpha lactose monohydrate under stirred conditions. *International Dairy Journal*, (66), 61–67. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2016.11.004>

- Bhargava, A., & Jelen, P. (1996). Lactose solubility and crystal growth as affected by mineral impurities. *Journal of Food Science*, *61*, 180–184. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1996.tb14754.x>
- Chandrapala, J., Gauthier, C., & Vasiljevic, T. (2017). Behaviour of lactose with the presence of lactic acid and Ca as affected by pH. *Journal of Dairy Research*, *84*(4), 484–487. <https://doi.org/10.1017/S0022029917000553>
- Goulart, D. B. (2021). Principles of lactose crystallization and rheology of milk protein concentrate. *Research, Society and Development*, *10*(15), 1–21. <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v10i15.23028>
- Goulart, D. B., & Hartel, R. W. (2017). Lactose crystallization in milk protein concentrate and its effects on Rheology. *Journal of Food Engineering*, *212*, 97–107. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.05.012>
- Gänzle, M. G., Haase, G., & Jelen, P. (2008). Lactose: Crystallization, hydrolysis and value-added derivatives. *International Dairy Journal*, *18*, 685–694. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2008.03.003>
- Haque, M. K., & Roos, Y. H. (2004). Water sorption and plasticization behavior of spray-dried lactose/protein mixtures. *Journal of Food Science*, *69*, 384–391. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2004.tb17863.x>
- Halfwerk, R., Verdonk, L., Yntema, D., Spronsen, J. V., & Van der Pad, A. (2023). Scaling up continuous eutectic freeze crystallization of lactose from whey permeate: A pilot plant study at sub-zero temperatures. *Food Research International*, *168*, 112764. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.112764>
- Heffels S. K., Jong E. J., & Sinke D. J. (1987). Growth rate of small sucrose crystals at 70°C. *Zuckerind*, *112*(6), 511–518.
- Holsinger, V. H. (1988). Lactose. In N. P. Wong, R. Jenness, M. Keeney, & E. H. Marth (Eds.), *Fundamentals of dairy chemistry* (3rd ed., pp. 279–342). New York: Springer New York.
- Miao, S., & Roos, Y. H. (2006). Crystallization kinetics and X-ray diffraction of crystals formed in amorphous lactose, trehalose, and lactose/trehalose mixtures. *Journal of Food Science*, *70*, 350–358. <http://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2005.tb09976.x>
- Nasirpour, A., Scher, J., Lindner, M., & Desobry, S. (2006). Modeling of lactose crystallization and colour changes in model infant foods. *Journal of Dairy Science*, *89*, 2365–2373. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(06\)72309-8](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(06)72309-8)
- Paterson, A. H. J. (2017). Lactose processing: From fundamental understanding to industrial application. *International Dairy Journal*, *67*, 80–90. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2016.07.018>
- Schoen, H. M. (1961). Crystallization is a two-step process-nucleation and growth. *Industrial & Engineering Chemistry*, *53*, 607–611. <https://doi.org/10.1021/ie50620a018>
- Smykov, I., Gnezdilova, A., Vinogradova, Y., Muzykantova, A., & Lyamina, A. (2019). Cooling curve in production sweetened concentrated milk supplemented with whey: Influence on the size and microstructure of lactose crystals. *Journal Food Science and Technology International*, *25*(6), 1–11. <https://doi.org/10.1177/1082013219830494>
- Wong, N. P. (1988) *Fundamentals of dairy chemistry* (3rd. ed.). New York: Van Nostrand Reinhold Company.

ОБ АВТОРАХ

Шохалов Владимир Алексеевич, доцент кафедры технологического оборудования Вологодской государственной молочнохозяйственной академии имени Н. В. Верещагина (160555, Российская Федерация, Вологодская область, городской округ город Вологда, село Молочное, ул. Шмидта, д. 2), ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-9276-4351>, SPIN-код:9384–2672, v_shohalov@mail.ru

Гнездилова Анна Ивановна, профессор кафедры технологического оборудования Вологодской государственной молочнохозяйственной академии имени Н. В. Верещагина (160555, Российская Федерация, Вологодская область, городской округ город Вологда, село Молочное, ул. Шмидта, д. 2) ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5484-8291>, Scopus ID: 57190976899, SPIN-код: 4828-1392, gnezdilova.anna@mail.ru

Виноградова Юлия Владимировна, доцент кафедры технологического оборудования Вологодской государственной молочнохозяйственной академии имени Н. В. Верещагина, (160555, Российская Федерация, Вологодская область, городской округ город Вологда, село Молочное, ул. Шмидта, дом 2), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8049-3287>, Scopus ID: 58251560700, Researcher ID: U-9555-2017, SPIN-код: 6579-4716, vinogradova_vgmha@mail.ru

Шохалова Вероника Николаевна, начальник отдела обеспечения лабораторной деятельности Федерального бюджетного учреждения здравоохранения «Центр гигиены и эпидемиологии в Вологодской области» (160012, Российская Федерация, городской округ город Вологда, ул. Яшина, д. 1а), ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-4911-3183>, SPIN-код: 4993-3461, v-shohalova@mail.ru

ABOUT THE AUTHORS

Vladimir A. Shokhalov, Candidate of Sciences (Technics), associate professor of the Dairy Equipment Chair Vologda State Dairy Farming Academy named after N.V. Vereshchagin (160555, Russian Federation, Vologda Oblast, Vologda urban district, Molochnoye village, Shmidta street, house 2), ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-9276-4351>, SPIN-код:9384–2672, v_shohalov@mail.ru

Anna I. Gnezdilova, Doctor of Science (Technics), Professor of the Technological Equipment Chair Vologda State Dairy Farming Academy named after N.V. Vereshchagin (160555, Russian Federation, Vologda Oblast, Vologda urban district, Molochnoye village, Shmidta street, house 2), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5484-8291>, Scopus ID: 57190976899, SPIN-код: 4828-1392, gnezdilova.anna@mail.ru

Yulia V. Vinogradova, Candidate of Sciences (Technics), associate professor of the Dairy Equipment Chair Vologda State Dairy Farming Academy named after N.V. Vereshchagin (160555, Russian Federation, Vologda Oblast, Vologda urban district, Molochnoye village, Shmidta street, house 2), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8049-3287>, Scopus ID: 58251560700, Researcher ID: U-9555-2017, SPIN-код: 6579-4716, vinogradova_vgmha@mail.ru

Veronika N. Shokhalova, Candidate of Sciences (Technics), Head of the department The Vologda State Center of Hygieneology of Epidemiology (160012, Russian Federation, Vologda urban district, Yashina street, house 1a), ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-4911-3183>, SPIN-код: 4993-3461, v-shohalova@mail.ru