

Интенсификация процесса кристаллизации лактозы из сгущенного НФ-концентрата творожной сыворотки

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

Е. А. Фиалкова, А. А. Кузин, Е. В. Славоросова,
В. Б. Шевчук, В. А. Шохалов

КОРРЕСПОНДЕНЦИЯ:

Елена Викторовна Славоросова

E-mail: Slavorosova.E.V@2.molochnoe.ru

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

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>

ПОСТУПИЛА: 11.04.2024

ДОРАБОТАНА: 13.08.2024

ПРИНЯТА: 15.09.2024

ОПУБЛИКОВАНА: 30.09.2024

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

автор сообщает об отсутствии
конфликта интересов.



АННОТАЦИЯ

Введение: Кристаллизация лактозы для ее отделения от жидкой фракции является ключевым этапом в производстве частично делактозированной деминерализованной сыворотки, которая может применяться в пищевой промышленности. Такая технология позволяет получать два ценных продукта: молочный сахар и частично делактозированную деминерализованную сыворотку, состав которой близок к молоку. Это решение особенно актуально для малых и средних молокоперерабатывающих предприятий, которые ежедневно производят 20–50 тонн сыворотки. В большинстве исследований используется традиционный метод кристаллизации лактозы.

Цель: Теоретически и экспериментально обосновать интенсификацию процесса кристаллизации лактозы из сгущенного НФ-концентрата творожной сыворотки путем применения циклических температурных режимов для увеличения выхода молочного сахара.

Материалы и методы: Исходный НФ-концентрат имел степень деминерализации $48 \pm 2\%$, массовую долю сухих веществ $55 \pm 0,5\%$, содержание лактозы — $79,6\%$. Экспериментальный образец подвергался циклическому температурному режиму: три шестидесятиминутных охлаждения до $6-8^\circ\text{C}$ и два пятнадцатиминутных нагрева до 67°C и 60°C соответственно. В контрольном образце кристаллизация осуществлялась традиционно. Общее время процессов составило 3,5 часа. Оценивались температура кристаллизата, содержание сухих веществ и масса кристаллизата. В теоретическом исследовании использовались методы анализа, дифференцирования и математического моделирования.

Результаты: Анализ процессов теплопередачи, испарения и кристаллизации при циклическом температурном режиме позволил установить математические зависимости между количеством кристаллизованной лактозы, концентрацией сухих веществ и физико-химическими параметрами кристаллизата, зависящими от температуры. Адекватность аналитических зависимостей подтверждена экспериментально. Установлено, что циклический температурный режим увеличивает средний размер кристалла в 4 раза и процент выкристаллизованной лактозы в 1,5 раза по сравнению с контрольным образцом.

Выводы: Применение циклического температурного режима в кристаллизации лактозы позволяет повысить ее выход и размер кристаллов, обеспечивая эффективное отделение лактозы и получение частично делактозированной деминерализованной сыворотки. Это решает задачу переработки сыворотки в пищевых целях на малых и средних предприятиях. Перспективы дальнейших исследований включают оптимизацию температурных режимов и циклов, а также разработку методов интенсификации процесса.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

НФ-концентрат; творожная сыворотка; лактоза; циклические температурные режимы кристаллизации; кристаллизация лактозы; нанофильтрация

Intensification of the Lactose Crystallization Process from Condensed NF-Curd Whey Concentrate

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

Evgenia A. Fialkova, Andrei A. Kusun, Elena V. Slavorosova,
Vladimir B. Shevchuk, Vladimir A. Shohalov

CORRESPONDENCE:

Elena V. Slavorosova

E-mail: Slavorosova.E.V@2.molochnoe.ru

FOR CITATIONS:

Fialkova, E. A., Kusun, 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. <https://doi.org/10.36107/spfp.2024.3.549>

RECEIVED: 11.04.2024

REVISED: 13.08.2024

ACCEPTED: 15.09.2024

PUBLISHED: 30.09.2024

DECLARATION OF COMPETING

INTEREST: none declared.



ABSTRACT

Introduction: The crystallization of lactose to separate it from the liquid fraction is a fundamental process in the production of an innovative product - partially delactosed demineralized whey. This technology implies obtaining two valuable products, namely, milk sugar and partially delactosed demineralized whey, which has a composition close to the composition of milk. This is especially relevant for small and medium-sized dairy processing enterprises that produce 20–50 tons of whey daily. However, most of the research aimed at investigating the crystallization process of lactose rely on the traditional crystallization method.

Purpose: To theoretically and experimentally substantiate the intensification of the process of crystallization of lactose from condensed NF concentrate of curd whey using cyclic temperature regimes to increase the yield of milk sugar.

Materials and Methods: The initial NF concentrate had a degree of demineralization (48 ± 2 %), contained a mass fraction of solids (55 ± 0.5 %), lactose – 79.6 %. The experimental sample was subjected to cyclic temperature treatment, which included three sixty-minute cooling to temperatures of 6–8 °C and two fifteen-minute heating to temperatures of 67 °C and 60 °C, respectively. In the control sample, crystallization was carried out in the traditional way. The total duration of the processes for the experimental and control samples was 3.5 hours. During the experiment, the temperature of crystallize, dry matter content and crystallize mass were determined. Analysis, differentiation and mathematical modeling methods were used for a theoretical part of the study.

Results: Analysis of heat transfer, evaporation and crystallization processes under cyclic temperature conditions enabled us to establish mathematical relationships between the amount of crystallized lactose, the concentration of dry substances and the physicochemical parameters of the crystallize, which depend on temperature. The adequacy of analytical dependencies was confirmed experimentally. As a result of experimental studies it is established that at cyclic temperature mode of crystallization the average crystal size increases 4 times and the percentage of crystallized lactose – 1.5 times in comparison with the control sample.

Conclusion: The use of cyclic temperature regimes in the crystallization of lactose allows increasing its yield and crystal size, ensuring effective separation of lactose and obtaining partially delactosed demineralized whey. This solves the problem of whey processing for food purposes in small and medium enterprises. Prospects for further research encompass optimization of temperature regimes and cycles, as well as the development of methods for the process intensification.

KEYWORDS

NF-concentrate; curd whey; lactose; cyclic temperature regimes of crystallization; lactose crystallization; nanofiltration

ВВЕДЕНИЕ

Наиболее распространенным в мировой практике способом переработки молочной сыворотки является сушка. Сухая сыворотка широко используется в производстве продуктов, обладающих направленным действием, инновационных продуктов питания, БАД-био корректоров, лекарственных и косметических препаратов (Бахолдина и соавт., 2022). Например, введение сывороточных ингредиентов в состав рецептур мороженого, благодаря пенообразующим свойствам сывороточных белков, повышает способность смеси к насыщению воздухом и придаёт продукту диетические свойства (Симоненкова & Дозорова, 2021; Шохалова и соавт., 2017). Сыворотка решает проблему недостатка микроэлементов в традиционных молочных продуктах, в частности цинка (Blinov et al., 2021).

Распространенными направлениями переработки сыворотки являются получение концентрата сывороточных белков и молочного сахара (Волкова, 2022). Сывороточные белки имеют широкий спектр применения в пищевой промышленности. Например, использование микропартикулята сывороточных белков в технологии полутвёрдых сыров позволяет заместить часть сухих веществ молока и, тем самым, снизить расход молочного сырья (Мельникова & Станиславская, 2019). Напитки с функциональными свойствами, производимые на основе сыворотки, обладающей большим содержанием минорных компонентов, стимулируют усиление иммунитета (Данильчук и соавт., 2020; Новокшанова & Абабкова, 2015). Сыворотка также входит в состав смесей для производства заварных сортов хлеба улучшенного качества (Акулич и соавт., 2021; Boutin 2005). Использование в составе хлеба сывороточных белков, позволяет получить продукт с функциональными свойствами, который может быть использован, например, для профилактики остеопороза (Беляев и соавт., 2020). Для обогащения кондитерских изделий белком, кроме молочного белка используют концентрат сывороточного белка (McSweeney et al., 2022; Ткешелашвили и соавт., 2019). Также белки молочной сыворотки входят в состав продуктов для энтерального питания (Антюшко & Гавалко, 2019) с целью улучшения их аминокислотного состава. Белковые гидролизаты

в составе смесей для детского питания, позволяют получить продукты с гипоаллергенными свойствами (McSweeney et al., 2022; Зорин и соавт., 2020; Костылева и соавт., 2022).

Основной нутриент молочной сыворотки — лактоза нормализует протекание биохимических и микробиологических процессов в организме человека, в частности, поддерживает микробиоценоз в желудочно-кишечном тракте и способствует усвоению микроэлементов (Волкова & Оносовская, 2022). Лактоза представлена в промышленности в виде специального продукта — молочного сахара, который традиционно получают кристаллизацией лактозы из концентрированных сиропов сыворотки (ГОСТ 33567–2015)¹. Этот продукт пользуется высоким спросом в различных отраслях, особенно в пищевой промышленности, сельском хозяйстве и здравоохранении, но в настоящее время в России практически не производится.

Несмотря на содержание в составе натуральной сыворотки ценнейших компонентов, она имеет ряд недостатков: содержит избыток минеральных солей, лактозы, влаги имеет низкую массовую долю сухих веществ. Для устранения указанных недостатков сыворотку подвергают обработке мембранными методами (электродиализ, нанофильтрация, диафильтрация), выпариванию и сушке. Однако сухая деминерализованная сыворотка (ГОСТ Р 56833–2015)² содержит избыточное количество лактозы (до 80 % в пересчете на сухое вещество) и низкое содержание белка (не более 11 %), что не позволяет широко использовать сухую сыворотку в составе традиционных молочных продуктов, имеющих значительно меньшее содержание лактозы и большее содержание белка.

В конце XX века в странах запада с развитой молочной промышленностью появилось новое перспективное направление переработки сыворотки — производство так называемой частично делактозированной сыворотки (partially delactosed whey). Сухая частично делактозированная деминерализованная сыворотка, имеет следующий состав: лактоза — 43,0 %, белок — 33 %, зола — 11,5 %, влага — 7,2 % (Francis, 1971). Сухой продукт с таким соотношением лактозы, белка и золы можно исполь-

¹ ГОСТ 33567–2015. (2016). *Сахар молочный. Технические условия*. М.: Стандартинформ

² ГОСТ Р 56833–2015. (2016). *Сыворотка молочная деминерализованная. Технические условия*. М.: Стандартинформ

зывать в производстве традиционных молочных продуктов на том же предприятии, где она получена. Способ получения такой сыворотки предполагает использование высокопроизводительного и энергозатратного оборудования, такого как, вакуум-выпарные аппараты, электродиализные и сушильные установки.

В России самые серьезные проблемы с переработкой сыворотки стоят перед малыми и средними предприятиями с объемами переработки молока менее 50 т в сутки (Свириденко и соавт., 2008). Нами разработан способ производства частично декантаризованной деминерализованной сыворотки, который экономически целесообразно применять на малых и средних молокоперерабатывающих предприятиях. Предложенный способ включает нано- и диалфильтрацию исходной сыворотки до содержания сухих веществ 28–30%, выпаривание полученного концентрата (НФ-концентрат) в специальном кристаллизаторе-выпаривателе до 50–55% содержания сухих веществ, последующую кристаллизацию и отделение выкристаллизованной лактозы (Славоросова и соавт., 2022).

Процесс кристаллизации является проблематичным с точки зрения оптимизации его технологических режимов. Ввиду сложности процесса кристаллизации из растворов обширные теоретические исследования чаще всего сопоставляются с конкретными экспериментальными данными для каждого кристаллизующего вещества (Верезуб и соавт., 2018; Верезуб и соавт., 2019; Верезуб и соавт., 2020; Prostomolotov et al., 2020; Простомолотов & Верезуб, 2021; Slivchenko et al., 2017; Славянский и соавт., 2019). Процесс кристаллизации лактозы из сгущенной сыворотки осложнен присутствием белков, солей, кислот и т.д. (Mimouni et al., 2005; Гнездилова и соавт., 2012; Гнездилова и соавт., 2013, Dincer, 2014, Goulart & Hartel, 2017; Sunkesula, 2020; Wijayasinghe et al., 2020; Darmali et al., 2021). Однако все исследования проводились при традиционном режиме кристаллизации лактозы, основным недостатком, которого, является малый процент выкристаллизованной лактозы и мелкие кристаллы. Поэтому вопросы, связанные с технологиями интенсификации процесса кристаллизации молочного сахара из лактозосодержащих растворов, таких как молочная сыворотка, молочные и сывороточные пермиаты являются актуальными.

Одним из эффективных способов увеличения среднего размера кристалла является использование циклического температурного режима кристаллизации (Бажал и соавт., 1973; Фиалкова и соавт., 2015), который заключается в попеременном охлаждении, чередующемся с нагреванием кристаллизующегося раствора. В цикле нагревания из-за быстрого растворения мелких кристаллов увеличивается концентрации раствора, благодаря чему, в последующем цикле охлаждения возрастает скорость роста крупных кристаллов, которые не успели раствориться за время нагревания. На эффективность процесса влияет диапазон варьирования температур и частота их колебаний.

Целью данного исследования является теоретическое и экспериментальное обоснование интенсификации процесса кристаллизации лактозы из сгущенного НФ-концентрата творожной сыворотки с применением циклических температурных режимов для увеличения выхода молочного сахара.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование проводилось на кафедре технологического оборудования ФГБОУ ВО Вологодская ГМХА.

Объекты и материалы

Объектом исследования являлся процесс кристаллизации лактозы, совмещенной с процессом выпаривания НФ-концентрата творожной сыворотки. В качестве предмета исследования был выбран НФ-концентрат (нанопермембранный концентрат) с массовой долей сухих веществ ($24 \pm 0,5$ %), полученный путем обработки творожной сыворотки на пилотной НФ-установке, оснащенной полимерной мембраной с массовой долей отсечки 200 Да при температуре (40 ± 1) °С и давлении до ($26 \pm 0,5$) бар. Деминерализованный до (48 ± 2) % НФ-концентрат предварительно сгущали до достижения следующих показателей: массовая доля сухих веществ ($55 \pm 0,5$ %), лактоза — 79,6 %, белок — 13,2 %, зола — 3,7 % и прочее 3,5 % в пересчете на сухое вещество. Исходная сыворотка поставлялась с поточной линии производства творога АО «Учебно-опытный молочный завод» ВГМХА им. Н.В. Верещагина.

Оборудование

Экспериментальные исследования проводились на лабораторной установке, которая состояла из двух емкостных аппаратов — кристаллизатора-выпаривателя 4 с циклическими температурными режимами (Куленко и соавт., 2016) (Рисунок 1а) и традиционного кристаллизатора 24 с режимом постоянного охлаждения (Рисунок 1б).

Циклический температурный режим осуществлялся попеременной подачей в термостат 3 горячей и холодной воды по трубкам 11 и 12 при перекрытии соответствующих кранов 13 и 14 и сливе отработанной воды через патрубок 5. Кристаллизатор 24 охлаждался холодной водой, поступающей через кран 18 в термостат 19 с тепловой изоляцией 20 и далее сливался по трубке 22. Температура кристаллизата и теплоносителя определялась термометрами 21. Мешалка 25 интенсифицировала тепло- и массообмен в также исключала оседание кристаллов. Температура теплоносителя и кристаллизата определялись с помощью термометров

6. Охлажденный воздух подавался непосредственно в кристаллизат через барботер 15 по воздуховоду 1 с краном 2, а нагретый — по воздуховоду 17 с краном 16. Воздушный поток разбивался на отдельные пузырьки 8, где насыщался влагой кристаллизата, что приводило к его выпариванию. Образующийся слой пены 7 обеспечивал дополнительный теплоизоляционный слой верхней открытой части аппарата.

Методы

Показатели состава и свойств сыворотки определялись стандартизованными методами с использованием приборной базы кафедры технологического оборудования и АО «Учебно-опытный молочный завод» ВГМХА им. Н.В. Верещагина.

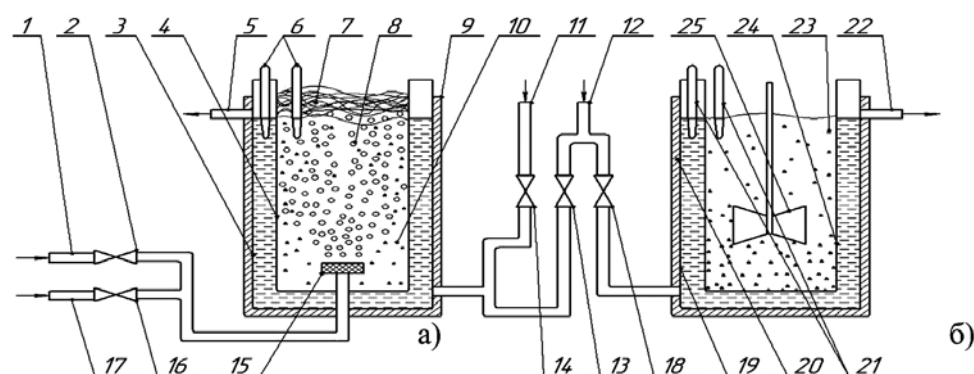
Физико-химические показатели сгущенного НФ-концентрата творожной сыворотки определяли с помощью стандартных методов исследований: массовая доля лактозы определялась методом Бер-

Рисунок 1

Экспериментальная установка

Figure 1

Experimental Setup



Примечание. (а) для реализации циклических температурных режимов кристаллизации лактозы из сгущенной сыворотки, (б) для реализации традиционного режима кристаллизации: 1, 17 — воздуховоды подачи теплого и холодного воздуха; 2, 13, 14, 16, 18 — запорные вентили; воздуховод подачи теплого воздуха; 3, 19 — термостаты; 4, 24 — кристаллизаторы; 5, 22 — трубки для отвода теплоносителя из термостата; 6, 21 — термометры; 7 — пена; 8 — пузырьки воздуха; 9, 20 — тепловая изоляция; 10, 23 — кристаллизат; 11 — трубка подачи горячей воды; 12 — трубка подачи холодной воды; 15 — барботер; 25 — мешалка.

Note. (a) for implementing cyclic temperature regimes for lactose crystallization from condensed whey, (b) for implementing the traditional crystallization regime: 1, 17 — warm and cold air supply ducts; 2, 13, 14, 16, 18 — shut-off valves; 3, 19 — thermostats; 4, 24 — crystallizers; 5, 22 — pipes for removing the heat carrier from the thermostat; 6, 21 — thermometers; 7 — foam; 8 — air bubbles; 9, 20 — thermal insulation; 10, 23 — crystallized product; 11 — hot water supply pipe; 12 — cold water supply pipe; 15 — sparger; 25 — mixer.

трана (ГОСТР 54667–2011)³ массовая доля белковых веществ определялась по ГОСТ 34454–2018⁴, массовая доля золы определялась методом озоления (ГОСТ 5901–2014, п.8.3–8.4)⁵. Пробы подготавливались в соответствии с п.6.2 ГОСТ 26809.1–2014⁶. Содержание сухих веществ определялось с помощью рефрактометра RL-3, (PZO, Польша) в соответствии с инструкцией по эксплуатации прибора.

Температура определялась термометрическим методом в соответствии с ГОСТ 26754–85⁷, с помощью термометров типа Checktemp 1 HI98509 Digital Thermometer (Hanna Instruments s.r.l., Румыния), пределы допускаемой абсолютной погрешности $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$.

Микроскопические исследования проводились на микроскопе OLYMPUS CX31 в комплекте с камерой TouPCam U3CMOS18000KPA с программным обеспечением TouView. (Olympus, Япония).

Определение массы кристаллизата в процессе выпаривания проводили гравиметрическим методом по ГОСТ 29245–91⁸ методом на весах марки AX324 (Ohaus Instruments (Shanghai) Co., Ltd», КНР).

Для теоретического исследования применялись анализ, метод дифференцирования и математическое моделирование.

Процедура исследования

Процедура экспериментальных исследований состояла в следующем. НФ-концентрат с начальной температурой 68°C разделялся на два образца — опытный и контрольный, массой по 0,15 кг каждый, один из которых подвергался циклической температурной обработке, а второй охлаждался традиционным способом в течение 3,5 часов. Циклическая обработка опытного образца состояла в его последовательном охлаждении и нагревании. Продолжительность процесса охлаждения составляла один

час, нагревания — 15 минут. Цикл работы включал 3 охлаждения и 2 нагревания. Охлаждение опытного образца осуществлялось холодной водой с температурой $3\text{--}5^{\circ}\text{C}$ путем теплопередачи и барботированием охлажденного до температуры 10°C воздуха. Нагревание осуществлялось горячей водой с температурой $70\text{--}75^{\circ}\text{C}$ и подогретым до температуры 40°C воздухом, который барботировался в кристаллизат. Воздух с начальной температурой 20°C поступал из окружающей среды, а затем охлаждался или нагревался до соответствующей температуры и поступал непосредственно в кристаллизат по воздуховодам 17 и 1 (Рисунок 1). Расход воздуха в процессе работы экспериментальной установки уменьшался от $21 \cdot 10^{-6}$ до $16 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$, так как барботер засорялся белком и выкристаллизованной лактозой. С помощью барботера 15 воздушный поток преобразовывался в отдельные пузырьки диаметром 1,5–2 мм, за счет чего он приобретал температуру кристаллизата.

В ходе эксперимента фиксировалась температура кристаллизата, содержание сухих веществ в межкристалльном растворе и масса кристаллизата. Температура и содержание сухих веществ в процессе охлаждения измерялись каждые 15 минут, а при нагревании — через 7 и 15 минут от начала процесса. Количество выпаренной влаги определялось по изменению массы кристаллизата в конце каждого цикла. Одновременно с этим производилась микрофотосъемка контрольного и экспериментального образцов.

Процедура теоретических исследований заключалась в следующем. Процесс кристаллизации сгущенного НФ-концентрата молочной сыворотки представляет определенные трудности с точки зрения математического анализа этого процесса. В процессе циклической кристаллизации при изменении температуры изменяются основные физико-химические параметры сгущенного НФ-концентрата: плотность, кинематическая и динамическая вязкость,

³ ГОСТР 54667–2011. (2012). *Молоко и продукты переработки молока. Методы определения массовой доли сахаров*. М.: Стандартинформ

⁴ ГОСТ 34454–2018. (2018). *Определение массовой доли белка методом Кьельдаля*. М.: Стандартинформ

⁵ ГОСТ 5901–2014. (2019). *Изделия кондитерские. Методы определения массовой доли золы и металломагнитной примеси*. М.: Стандартинформ

⁶ ГОСТ 26809.1–2014 (2019). *Молоко и молочная продукция. Правила приемки, методы отбора и подготовка проб к анализу. Часть 1. Молоко, молочные, молочные составные и молокосодержащие продукты*. М.: Стандартинформ

⁷ ГОСТ 26754–85. (2009). *Молоко. Методы измерения температуры*. М.: Стандартинформ

⁸ ГОСТ 29245–91 (2009). *Консервы молочные. Методы определения физических и органолептических показателей*. М.: Стандартинформ

содержание сухих веществ, растворимость лактозы, пересыщение, скорость кристаллизации, количество растворенной и выкристаллизовавшейся лактозы. Кроме того, существенное влияние на процесс оказывает расход воздуха, барботируемого в продукт. Для анализа изменения количества выкристаллизованной лактозы и процентного содержания сухих веществ в межкристалльной жидкости каждый цикл охлаждения и нагревания разбивался на такие интервалы времени $\Delta\tau$, в течение которого физические параметры кристаллизата можно условно принять изменяющимися линейно. Расчеты для процесса охлаждения производились при переменном интервале времени $\Delta\tau$, который варьировался в пределах от 1 с до 1 минуты, причем минимальный интервал соответствовал максимальной скорости изменения температуры в начале процесса.

В основу теоретических исследований процесса положено уравнение теплового баланса системы:

$$Q_1 - Q_2 + Q_3 = Q_4, \quad (1)$$

где Q_1 – количество теплоты, подводимое к кристаллизату с поступающим в него воздухом, Дж; Q_2 – количество теплоты, отводимое от кристаллизата воздухом выходящим из колонки, Дж; Q_3 – количество теплоты, которое получает кристаллизат от воды за счет теплопередачи, Дж; Q_4 – количество теплоты, которое получает кристаллизат, Дж.

Теоретические результаты получены при анализе процессов теплопередачи, выпаривания и кристаллизации лактозы.

Адекватность результатов теоретических исследований оценивалась путем сравнения с эксперимен-

тальными данными. Достоверность результатов экспериментальных исследований подтверждается 4-х кратной повторяемостью опытов.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В работе проведена сравнительная оценка процессов кристаллизации лактозы в деминерализованном сгущенном НФ-концентрате творожной сыворотки, осуществляемых традиционным способом и при циклических температурных режимах, с сопутствующим выпариванием влаги путем барботирования воздуха. Результаты исследований представлены в виде аналитических и экспериментальных зависимостей.

Математическая модель

Получены зависимости, позволяющие теоретически оценить количество выкристаллизованной лактозы и проанализировать изменение процентного содержания сухих веществ в межкристалльном растворе с учетом физико-химических параметров кристаллизата. Кроме того, учитывался расход воздуха и его термодинамические свойства.

Температура кристаллизата в конце каждого временного интервала, определялась на основе уравнения теплового баланса (1). Сравнение экспериментальных данных по времени подъема пузырька, с аналитическими данными по изменению его температуры в процессе перемещения в продукте показали, что температуру воздуха на выходе из колонки можно принять равной температуре кристаллизата t_k :

$$t_k = \frac{(c_v \cdot t_{в.н} + (d_{в.н} - d_{в.к}) \cdot r) \cdot \rho_v \cdot V_1 \cdot \Delta\tau + c_{кр} \cdot m_{кр} \cdot t_n + K_1 \cdot f_1 \cdot \Delta\tau \cdot (t_T - 0,5 \cdot t_n)}{c_v \cdot \rho_v \cdot V_1 \cdot \Delta\tau + c_{кр} \cdot m_{кр} + 0,5 \cdot K_1 \cdot f_1 \cdot \Delta\tau}, \quad (2)$$

где c_v – удельная теплоемкость воздуха, Дж/(кг·К); $t_{в.н}$ – температура воздуха на входе в колонку, °С; $d_{в.н}$ – влажностное содержание воздуха на входе в колонку, кг/кг; $d_{в.к}$ – влажностное содержание воздуха на выходе из колонки, кг/кг; r – удельная теплота парообразования, Дж/кг; ρ_v – плотность воздуха, кг/м³; V_1 – объемный расход воздуха, м³/с; $\Delta\tau$ – интервал времени в течение которого физические параметры кристаллизата изменяются по линейной зависимости, с; $c_{кр}$ – удельная теплоемкость кристаллизата, Дж/(кг·К); $m_{кр}$ – масса кристаллизата, кг; t_n – температура кристаллизата на начало промежутка времени $\Delta\tau$, °С; K_1 – коэффициент теплопередачи между кристаллизатом и горячей водой, Вт/(м²·К); f_1 – площадь поверхности теплопередачи, м²; t_T – температура теплоносителя, °С.

Поскольку целью процесса кристаллизации является наиболее полное отделение лактозы от сыворотки, то наибольший интерес представляет динамика изменения процента выкристаллизованной лактозы в процессе кристаллизации, сопровождающейся выпариванием при циклическом изменении температуры. В процессе циклической кристаллизации пересыщение раствора изменялось циклически. Для того, чтобы исключить влияние этого фактора введено понятие показателя скорости кристаллизации. Показатель скорости кристаллизации [1/ч] — снижение концентрации раствора на единицу пересыщения в единицу времени:

$$\vartheta = \frac{\Delta C}{\Delta \tau \cdot \Delta C_n}, \quad (3)$$

где ΔC — снижение концентрации раствора, кг лактозы на 100 кг воды в процентах, ΔC_n — пересыщение, кг лактозы на 100 кг воды в процентах.

Тогда масса выкристаллизовавшейся лактозы:

$$m_{кр.л.} = \frac{\Delta C}{100} \cdot m_{в.н} = \frac{\vartheta \cdot \Delta \tau \cdot \Delta C_n}{100} \cdot m_{в.н} \cdot (4)$$

Формулы для расчета величин, входящих в формулу (4), представлены в Таблице 1.

Таблица 1

Параметры для определения массы выкристаллизовавшейся лактозы

Table 1

Parameters for Determining the Mass of Crystallized Lactose

Название параметра	Формула
Пересыщение, кг лактозы на 100 кг воды в процентах	$\Delta C_n = C - C_{нас}$
Концентрация исследуемого раствора, кг лактозы на 100 кг воды в процентах;	$C = \frac{m_{р.л.н}}{m_{кр.л.} - m_{с.в.}} \cdot 100\%$
Концентрация насыщенного раствора, кг лактозы на 100 кг воды в процентах	$C_{нас} = 11,5 \cdot 10^{0,012 \cdot t_k}$
Показатель скорости кристаллизации, 1/с	$\vartheta = 9 \cdot 10^{0,045 \cdot t_k - 6}$

Подставив в формулу (4) параметры из Таблицы 1, получили выражение для определения массы выкристаллизовавшейся лактозы:

$$m_{кр.л.} = \frac{9 \cdot 10^{0,045 \cdot t_k - 6} \cdot \Delta \tau \cdot \left(\frac{m_{р.л.н}}{m_{кр.л.} - m_{с.в.}} \cdot 100\% - 11,5 \cdot 10^{0,012 \cdot t_k} \right)}{100} \cdot m_{в.н}, \quad (5)$$

где $m_{р.л.н}$ — масса растворенной лактозы на начало промежутка времени $\Delta \tau$, кг; $m_{кр.л.}$ — масса кристаллизата на начало промежутка времени $\Delta \tau$, кг; $m_{с.в.}$ — масса сухих веществ в кристаллизате, кг.

Содержание сухих веществ в межкристалльном растворе на конец промежутка времени $\Delta \tau$ определяется соотношением:

$$C.B. = \frac{m_{р.л.к} + m_б + m_з}{m_{р.л.к} + m_б + m_з + m_{в.к}} \cdot 100\%, \quad (6)$$

где $m_{р.л.к}$ — масса растворенной лактозы на конец промежутка времени $\Delta \tau$, кг; $m_б$ — масса белка, кг; $m_з$ — масса золы, кг; $m_{в.к}$ — масса влаги на конец промежутка времени $\Delta \tau$, кг.

Переменными параметрами в выражении (6) являются масса растворенной лактозы, которая изменяется в зависимости от количества выкристаллизованной лактозы:

$$m_{р.л.к} = m_{р.л.н} - m_{кр.л.}, \quad (7)$$

и масса влаги в кристаллизате, которая изменяется за счет её ухода или поступления с воздухом:

$$m_{в.к} = m_{в.н} - (d_{в.к} - d_{в.н}) \cdot \rho_v \cdot V_1 \cdot \Delta \tau. \quad (8)$$

Экспериментальные данные

На Рисунке 2 представлены результаты расчетов и опытные данные по изменению температуры кристаллизата в экспериментальном и контрольном образцах. Расчетные данные представлены с интервалом 5 минут.

Как видно из графика имеет место хорошее совпадение между экспериментальными и теоретическими кривыми. Абсолютная погрешность не превышает 2,5 °С.

На Рисунке 3 представлены результаты расчетов и опытные данные по содержанию растворенных сухих веществ в кристаллизате при циклическом изменении температуры, представленном на ри-

Рисунок 2

Изменение температуры кристаллизата в экспериментальном и контрольном образцах

Figure 2

Temperature Changes of Crystallized Product in Experimental and Control Samples

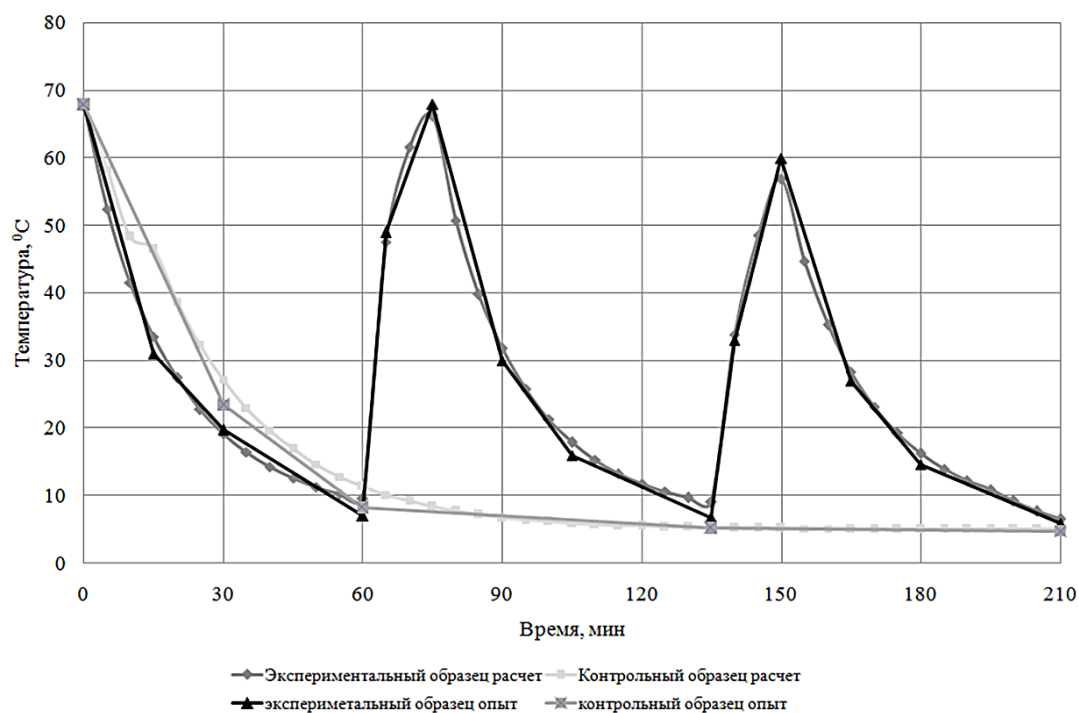


Рисунок 3

Изменение содержания растворенных сухих веществ в процессе кристаллизации

Figure 3

Changes in Soluble Solids Content During Crystallization Process

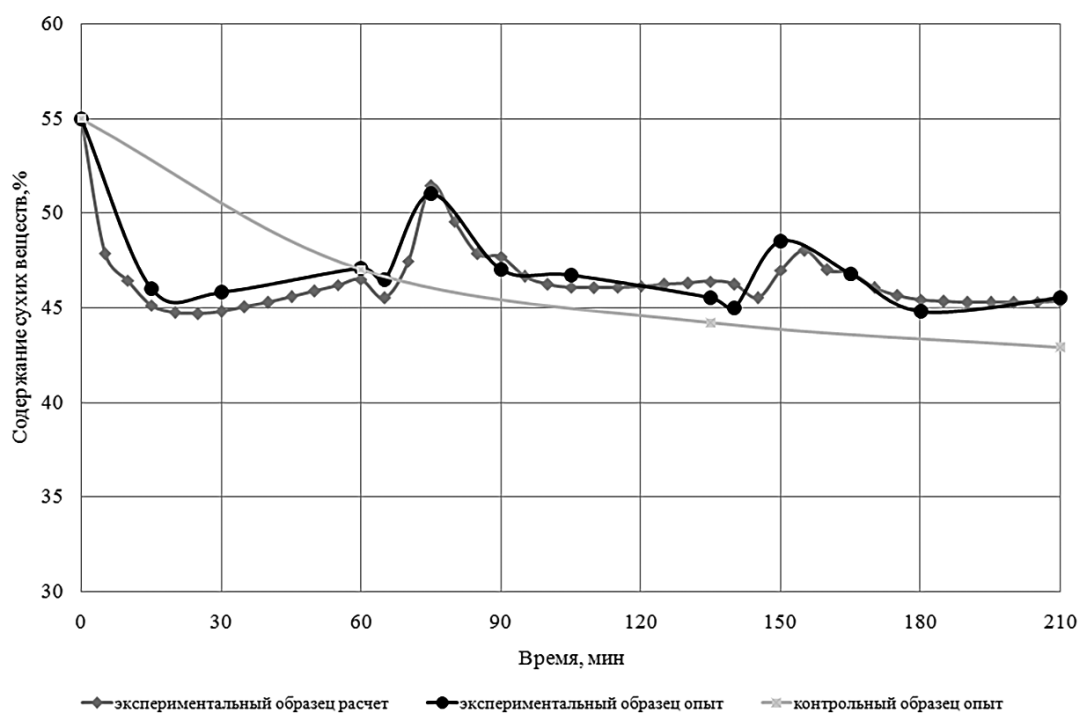
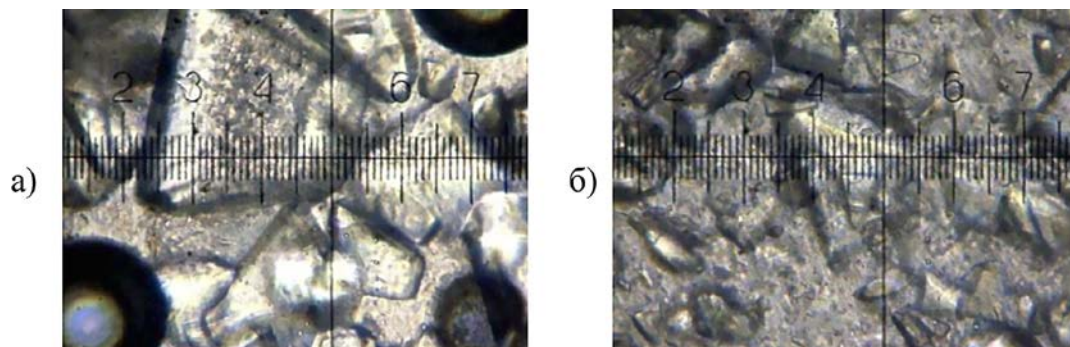


Рисунок 4

Микрофотографии кристаллов

Figure 4

Micrographs of Crystals



Примечание. (а) экспериментальный образец; (б) контрольный образец:
1 деление линейки = 6,2 мкм.

Note. (a) Experimental sample; (b) Control sample:
1 scale division = 6.2 μm .

сунке 2. Аналитические данные получены на основании приведенных выше формул (4–8).

В результате процесса циклической кристаллизации масса исходного образца уменьшилась от 0,155 до 0,125 кг, содержание сухих веществ в межкристальном растворе, определяемое по рефрактометру уменьшилось от 55 % до 45,5 %, количество растворенной лактозы уменьшилось с 0,079 кг до 0,023 кг, количество выкристаллизованной лактозы составило 0,056 кг. Для контрольного образца масса в течение всего процесса оставалась неизменной, содержание сухих веществ, определяемое по рефрактометру, уменьшилось от 55 % до 43 %, количество растворенной лактозы уменьшилось с 0,079 кг до 0,042 кг, количество выкристаллизованной лактозы составило 0,038 кг.

На процесс кристаллизации влияет большое количество факторов, таких как параметры кристаллизата (плотность, вязкость, содержание сухих веществ, растворимость лактозы, пересыщение, температура), а также воздуха (расход, температура, влагосодержание). Поэтому изменения массовой доли сухих веществ имеют достаточно сложную закономерность в каждом цикле. Совпадение направлений изменения содержания сухих веществ кристаллизата в аналогичных временных интервалах в опыте и в результате теоретического анализа подтверждает адекватность выдвинутой

математической модели. Абсолютная погрешность по сухим веществам не превышает 1,5 %.

На Рисунке 4 представлены микрофотографии кристаллов для экспериментального и контрольного образцов на конец эксперимента (через 210 минут). Средний размер кристалла в экспериментальном образце составляет 120 мкм, в контрольном образце — 30 мкм. Это является важным фактором в процессе последующего отделения выкристаллизованной лактозы.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Цель исследования, заключавшаяся в обосновании возможности интенсифицировать процесс кристаллизации лактозы с использованием циклических температурных режимов, была успешно достигнута. Проведенные эксперименты показали, что применение предложенной методики позволяет увеличить средний размер кристаллов в 4 раза и повысить процент выкристаллизованной лактозы в 1,5 раза по сравнению с традиционными методами. Эти результаты подтверждают эффективность нового подхода, в котором каждый цикл нагревания способствует растворению мелких кристаллов и росту более крупных, а барботирование воздуха повышает концентрацию сухих веществ в растворе.

Анализ температурных режимов показал, что циклические процессы помогают поддерживать высокий уровень пересыщения раствора, что стимулирует образование и рост кристаллов. Присутствие сывороточных белков, обычно осложняющее процесс кристаллизации и уменьшающее размер кристаллов (Mimouni и соавт., 2005), не оказало значительного влияния при использовании циклического режима. Полученные кристаллы достигали среднего размера 120 мкм, что значительно больше по сравнению с традиционным процессом, где размер кристаллов не превышал 30 мкм. Такие результаты согласуются с выводами Wijayasinghe и соавт. (2020) о том, что кислотность и белки могут влиять на размер кристаллов.

Неожиданным результатом исследования стало обнаружение увеличения содержания сухих веществ в межкристалльном растворе к концу каждого цикла охлаждения. Это явление можно объяснить взаимодействием процессов кристаллизации и выпаривания влаги, которые происходили одновременно и определяли конечные параметры раствора. Сходные эффекты описаны в работах Бажалы (1973) и Sunkesula (2020), где также подчеркивается важность учета множества факторов при кристаллизации.

В рамках дальнейших исследований следует учесть возможность использования методов интенсификации, традиционно применяемых при кристаллизации, таких как контроль скорости охлаждения (Pandalaneni и соавт., 2018), внесение затравки (Goulart и Hartel, 2017) и ультразвуковая обработка (Dincer, 2014). Увеличение скорости охлаждения, которое обычно приводит к уменьшению размера кристаллов, при циклических режимах может не иметь этого эффекта благодаря растворению мелких кристаллов при нагревании. Внесение затравки требует дальнейших исследований для адаптации к циклическим режимам, а ультразвуковая обработка представляется перспективной для повышения процента выкристаллизованной лактозы, несмотря на возможное образование мелких кристаллов, как это показано в работе Dincer (2014).

Ограничения исследования

Настоящее исследование, хотя и подтвердило эффективность применения циклических темпера-

турных режимов для кристаллизации лактозы, имеет несколько ограничений, связанных с особенностями методологии и оборудования. Во-первых, исследование проводилось на лабораторной установке, которая, несмотря на свою функциональность, может не полностью отражать условия промышленных масштабов. Оборудование включало кристаллизатор-выпариватель и традиционный кристаллизатор, использовавшиеся для моделирования процессов. Однако объемы продукта, обрабатываемые в лабораторных условиях, были ограничены, что может влиять на точность экстраполяции данных на производственные установки.

Процедура исследования подразумевала работу с относительно малыми образцами (по 0,15 кг), что также может ограничивать применимость результатов на крупных производствах, где условия тепло- и массообмена иная. Важно отметить, что расход воздуха постепенно снижался из-за засорения барботера белками и выкристаллизованной лактозой, что может вызвать необходимость дополнительных технических решений для обеспечения стабильности процесса в реальных условиях.

Другим важным фактором является сложность описания и анализа всех изменений физических и химических параметров НФ-концентрата в процессе циклической кристаллизации. Параметры, такие как плотность, вязкость, содержание сухих веществ и растворимость лактозы, изменяются с течением времени, что требует сложного математического моделирования. Применение метода линейного приближения изменений параметров в каждом временном интервале хотя и позволяет упростить расчеты, может приводить к некоторым погрешностям, особенно при увеличении продолжительности этих интервалов.

Также стоит отметить ограничения, связанные с температурными режимами. Верхние и нижние пределы температур были выбраны с учетом риска денатурации белков и изменения скорости кристаллизации, что снижает гибкость подхода при адаптации к различным условиям сырья. Применяемая температура нагревания и продолжительность циклов были ограничены, чтобы избежать негативных эффектов на качество продукта и эффективность процесса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ценность представленных результатов заключается в подтверждении высокой эффективности применения циклических температурных режимов при кристаллизации лактозы из сгущенного НФ-концентрата творожной сыворотки. Эти исследования показывают, что предложенный подход позволяет значительно интенсифицировать процесс, увеличивая средний размер кристаллов и выход лактозы. Оптимизация сложного процесса кристаллизации с использованием аналитических моделей, представленных в данной работе, предоставляет возможность сократить объем трудоемких и длительных экспериментальных исследований, что особенно важно для производственных процессов.

Перспективное применение разработанных методов видится в их адаптации для малых и средних молокоперерабатывающих предприятий. Это позволит получать частично делактозированную деминерализованную сыворотку и молочный сахар, что способствует расширению использования сыворотки в производстве молочной продукции, близкой по составу к натуральному молоку. Молочный сахар, который востребован на рынке и может служить импортозамещающим продуктом, является ценным побочным продуктом, получаемым в ходе данного процесса.

В отличие от известных технологий производства частично делактозированной сыворотки, требующих применения дорогостоящего оборудования и экономически нецелесообразных для малых объемов переработки, предложенный метод циклической кристаллизации может быть интегрирован в предприятия с ограниченными ресурсами. Процессы кристаллизации и отделения лактозы являются ключевыми этапами получения качественной частично делактозированной сыворотки и молочного сахара. Применение циклических режимов позволяет добиться улучшенных характеристик продукта при снижении производственных затрат.

В дальнейших исследованиях целесообразно сосредоточиться на оптимизации температурных

режимов, продолжительности циклов и разработке дополнительных способов интенсификации процесса. Это позволит еще больше повысить эффективность и рентабельность процесса, обеспечивая молокоперерабатывающие предприятия доступными технологиями для расширения спектра производимой продукции.

АВТОРСКИЙ ВКЛАД

Евгения Александровна Фиалкова — формулировка целей и задач исследования, создание рукописи и её редактирование.

Андрей Алексеевич Кузин — разработка методологии исследования, руководство исследованием.

Елена Викторовна Славоросова — проведение исследования, обработка результатов, написание черновика рукописи.

Владимир Борисович Шевчук — редактирование черновика рукописи, визуализация.

Владимир Алексеевич Шохалов — валидация и администрирование данных, редактирование черновика рукописи.

AUTHORS' CONTRIBUTION

Evgenia A. Fialkova: conceptualization, writing — original draft.

Andrei A. Kusin: methodology, supervision.

Elena V. Slavorosova: investigation, formal analysis, writing — review & editing.

Vladimir B. Shevchuk: writing — review & editing, visualization.

Vladimir A. Shohalov: validation, supervision, writing — review & editing.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Акулич, А. В., Самуйленко, Т. Д., & Тимакова, Р. Т. (2021). Разработка компонентного состава сухих композитных смесей для заварных сортов хлеба улучшенной пищевой ценности. *Хранение и переработка сельхозсырья*, (4), 158–171. <https://doi.org/10.36107/spfp.2021.240>
- Akulich, A. V., Samuilenko, T. D., & Timakova, R. T. (2021). Development of the component composition of dry composite mixtures for choux pastry bread with improved nutritional value. *Storage and Processing of Farm Products*, (4), 158–171. (In Russ.) <https://doi.org/10.36107/spfp.2021.240>
- Антюшко, Д. П., & Гавалко, Ю. В. (2019). Оценка пищевой ценности продуктов для энтерального питания. *Вопросы питания*, 88(5), 63–71. <https://doi.org/10.24411/0042-8833-2019-10055>
- Antyushko, D. P., & Gavalko, Yu. V. (2019). Evaluation of the nutritional value of products for enteral nutrition. *Problems of Nutrition*, 88(5), 63–71. (In Russ.) <https://doi.org/10.24411/0042-8833-2019-10055>
- Бахолдина, Т. Н., Храмцов, А. Г., Голик, А. Б., Оботурова, Н. П., & Абакумова, Е. А. (2022). Разработка методики получения структурированного десерта на основе композиции сухой деминерализованной сыворотки и арабиногалактана. В Инновационное развитие агропромышленного, химического, лесного комплексов и рациональное природопользование. *Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции* (с. 25–31). Великий Новгород: Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого.
- Bakholdina, T. N., Khramtstov, A. G., Golik, A. B., Oboturova, N. P., & Abakumova, E. A. (2022). Development of a methodology for obtaining a structured dessert based on a composition of dry demineralized whey and arabinogalactan. In *Innovative Development of the Agro-Industrial, Chemical, and Forestry Complexes and Rational Nature Management. Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference* (pp. 25–31). Veliky Novgorod: Yaroslav-the-Wise Novgorod State University. (In Russ.)
- Бажал, И. Г., Дзюбенко, Е. П., & Куреленко, О. Д. (1973). Интенсификация изогидрической кристаллизации при помощи принудительной рекристаллизации. *Журнал прикладной химии*, XLVI(9), 1973–1978.
- Bazhal, I. G., Dzyubenko, E. P., & Kurelenko, O. D. [et al.] (1973). Intensification of isohydric crystallization using forced recrystallization. *Zhurnal Prikladnoi Khimii*, XLVI(9), 1973–1978. (In Russ.)
- Беляев, Н. Г., Тимченко, Л. Д., Ржепаковский, И. В., Писков, С. И., Лодыгин, А. Д., Гапонов, В. И., & Хлебач, Т. С. (2020). Остеопротективный эффект хлеба, обогащенного белком, пищевыми волокнами, кальцием, железом и йодом, при гипостероид-индуцированном остеопорозе у крыс. *Вопросы питания*, 89(6), 58–69. <https://doi.org/10.24411/0042-8833-2020-10079>
- Belyaev, N. G., Timchenko, L. D., Rzhepakovsky, I. V., Piskov, S. I., Lodygin, A. D., Gaponov, V. I., & Khlebak, T. S. (2020). Osteoprotective effect of bread enriched with protein, dietary fiber, calcium, iron, and iodine in rats with hyposteroid-induced osteoporosis. *Problems of Nutrition*, 89(6), 58–69. (In Russ.) <https://doi.org/10.24411/0042-8833-2020-10079>
- Березуб, Н. А., Волошин, А. Э., Маноменова, В. Л., & Простомолотов, А. И. (2018). Гидродинамика раствора при скоростном росте кристаллов KDP. *Кристаллография*, 63(2), 302–306. <https://doi.org/10.7868/S0023476118020248>
- Verezub, N. A., Voloshin, A. E., Manomenova, V. L., & Prostomolotov, A. I. (2018). Solution hydrodynamics during the rapid growth of KDP crystals. *Crystallography Reports*, 63(2), 302–306. (In Russ.) <https://doi.org/10.7868/S0023476118020248>
- Березуб, Н. А., Волошин, А. Э., & Простомолотов, А. И. (2019). Гидродинамика и массоперенос при выращивании смешанных кристаллов из раствора. *Кристаллография*, 64(6), 973–978. <https://doi.org/10.1134/S0023476119060250>
- Verezub, N. A., Voloshin, A. E., & Prostomolotov, A. I. (2019). Hydrodynamics and mass transfer in the growth of mixed crystals from solution. *Crystallography Reports*, 64(6), 973–978. (In Russ.) <https://doi.org/10.1134/S0023476119060250>
- Березуб, Н. А., Волошин, А. Э., Маноменова, В. Л., & Простомолотов, А. И. (2020). Моделирование процессов гидродинамики и массопереноса при выращивании кристаллов KDP. *Кристаллография*, 65(4), 654–659. <https://doi.org/10.31857/S0023476120040268>
- Verezub, N. A., Voloshin, A. E., Manomenova, V. L., & Prostomolotov, A. I. (2020). Modeling of hydrodynamics and mass transfer processes in the growth of KDP crystals. *Crystallography Reports*, 65(4), 654–659. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0023476120040268>
- Волкова, Т. А. (2022). Комплексная переработка молочной сыворотки. В Актуальные вопросы производства сыра, масла и другой молочной продукции. *Сборник материалов международной научно-практической конференции* (с. 166–169). Углич: Всероссийский научно-исследовательский институт маслоделия и сыроделия.
- Volkova, T. A. (2022). Comprehensive processing of whey. In *Current Issues in Cheese, Butter, and Other Dairy Products. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference* (pp. 166–169). Uglich: All-Russian Scientific Research Institute of Butter and Cheese Making. (In Russ.)
- Гнездилова, А. И., Виноградова, Ю. В., & Музыкантова, А. В. (2012). Влияние компонентов молочной сыворотки на процесс зародышеобразования при кристаллизации лактозы. *Молочнохозяйственный вестник*, (3), 27–32.
- Gnezdilova, A. I., Vinogradova, Yu. V., & Muzykantsova, A. V. (2012). Influence of whey components on nucleation during lactose crystallization. *Molochnokhosyaistvenny Vestnik*, (3), 27–32. (In Russ.)

- Гнездилова, А. И., Музыкантова, А. В., & Виноградова, Ю. В. (2013). Влияние белков молочной сыворотки на процесс кристаллизации лактозы. *Хранение и переработка сельхозсырья*, (7), 21–23.
- Gnezdilova, A. I., Muzykantova, A. V., & Vinogradova, Y. V. (2013). Influence of whey proteins on lactose crystallization process. *Storage and Processing of Farm Products*, (7), 21–23. (In Russ.)
- Данильчук, Т. Н., Ефремова, Ю. Г., & Користина, И. В. (2020). Напитки на основе молочной сыворотки и сублиматов проростков растений. *Хранение и переработка сельхозсырья*, (3), 69–81. <https://doi.org/10.36107/spfp.2020.305>
- Danilchuk, T. N., Efremova, Y. G., & Koristina, I. V. (2020). Drinks based on whey and sublimates of plant sprouts. *Storage and Processing of Farm Products* (3), 69–81. (In Russ.) <https://doi.org/10.36107/spfp.2020.305>
- Зорин, С. Н., Сидорова, Ю. С., & Мазо, В. К. (2020). Ферментативные гидролизаты белков молочной сыворотки и куриного яйца: получение, физико-химическая и иммунохимическая характеристики. *Вопросы питания*, 89(1), 64–68. <https://doi.org/10.24411/0042-8833-2020-10007>
- Zorin, S. N., Sidorova, Y. S., & Mazo, V. K. (2020). Enzymatic hydrolysates of whey and egg proteins: Obtaining, physico-chemical, and immunochemical characteristics. *Problems of Nutrition*, 89(1), 64–68. (In Russ.) <https://doi.org/10.24411/0042-8833-2020-10007>
- Костылева, Е. В., Середина, А. С., Великорецкая, И. А., Минеева, Д. Т., & Цурикова, Н. В. (2022). Эффективность ферментного препарата на основе нового мутантного штамма *Bacillus subtilis*-96 при гидролизе белков молочной сыворотки и яичного белка. *Вопросы питания*, 91(2), 72–80. <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2022-91-2-72-80>
- Kostyleva, E. V., Sereda, A. S., Velikoretskaya, I. A., Mineeva, D. T., & Tsurikova, N. V. (2022). The effectiveness of an enzyme preparation based on a new mutant strain *Bacillus subtilis*-96 in the hydrolysis of whey and egg proteins. *Problems of Nutrition*, 91(2), 72–80. (In Russ.) <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2022-91-2-72-80>
- Куленко, В. Г., Шевчук, В. Б., Славорова, Е. В., Фиалкова, Е. А. (2016). *Кристаллизатор-выпариватель* (RU2590755C1). Патенты Google. <https://patents.google.com/patent/RU2590755C1/ru>
- Kulenko, V. G., Shevchuk V. B., Slavorosova, E. V., Fialkova, E. A. (2016). *Crystalliser-evaporator* (RU2590755C1). Google Patents. (In Russ.) <https://patents.google.com/patent/RU2590755C1/ru>
- Мельникова, Е. И., & Станиславская, Е. Б. (2019). Применение микропартикулята сывороточных белков в технологии полутвердых сыров. *Хранение и переработка сельхозсырья*, (4), 129–140. <https://doi.org/10.36107/spfp.2019.199>
- Melnikova, E. I., & Stanislavskaya, E. B. (2019). Application of microparticulated whey proteins in the technology of semi-hard cheeses. *Storage and Processing of Farm Products*, (4), 129–140. (In Russ.) <https://doi.org/10.36107/spfp.2019.199>
- Новокшанова, А. Л., & Абабкова, А. А. (2015). Специализированные белковые кисломолочные напитки. *Вопросы питания*, 84(S3), 52–53.
- Novokshanova, A. L., & Ababkova, A. A. (2015). Specialized protein fermented milk drinks. *Problems of Nutrition*, 84(S3), 52–53. (In Russ.)
- Простомолотов, А. И., & Везеуб, Н. А. (2021). Анализ гидродинамики при синтезе кристаллов из водно-солевых растворов. *Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники*, 24(3), 170–175. <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2021-3-170-175>
- Prostromolotov, A. I., & Verezub, N. A. (2021). Analysis of hydrodynamics in the synthesis of crystals from aqueous salt solutions. *Materials of Electronics Engineering*, 24(3), 170–175. (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2021-3-170-175>
- Свириденко, Ю. А., Кравченко, Э. Ф., & Яковлева, О. А. (2008). Использование молочной сыворотки и локальная очистка стоков. *Молочная промышленность*, (11), 58–60.
- Sviridenko, Y. A., Kravchenko, E. F., & Yakovleva, O. A. (2008). Use of whey and local wastewater treatment. *Dairy Industry*, (11), 58–60. (In Russ.)
- Симоненкова, А. П., & Дозорова, Е. А. (2021). Технологические возможности применения молочной сыворотки в технологии мороженого геродиетической направленности. *Ресурсосберегающие технологии при хранении и переработке сельскохозяйственной продукции* (с. 143–151). Орел: Издательство «Картуш».
- Simonenkova, A. P., & Dozorova, E. A. (2021). Technological possibilities of using whey in the production of geriatric ice cream. In *Resource-Saving Technologies in the Storage and Processing of Agricultural Products* (pp. 143–151). Orel: Kartush Publishing House. (In Russ.)
- Славорова, Е. В., Шевчук, В. Б., Фиалкова, Е. А., Голденшлях, О. Н., & Нечаев, К. А. (2022). Перспективный способ переработки молочной сыворотки. *Молочная промышленность*, (12), 14–16. <https://doi.org/10.31515/1019-8946-2022-12-14-16>
- Slavorosova, E. V., Shevchuk, V. B., Fialkova, E. A., Goldenshlach, O. N., & Nechaev, K. A. (2022). A promising method for whey processing. *Dairy Industry*, (12), 14–16. (In Russ.) <https://doi.org/10.31515/1019-8946-2022-12-14-16>
- Славянский, А. А., Семенов, Е. В., Грибкова, В. А., & Николаева, Н. В. (2019). Особенности процесса кристаллизации в пересыщенном растворе (на примере сахарного производства). *Хранение и переработка сельхозсырья*, (3), 138–147. <https://doi.org/10.36107/spfp.2019.171>
- Slavyansky, A. A., Semenov, E. V., Gribkova, V. A., & Nikolaeva, N. V. (2019). Features of the crystallization process in a supersaturated solution (using the example of sugar production). *Storage and Processing of Farm Products*, (3), 138–147. (In Russ.) <https://doi.org/10.36107/spfp.2019.171>
- Ткешелашвили, М. Е., Бобожонова, Г. А., & Сорокина, А. В. (2019). Разработка кондитерских изделий обогащенных белком. *Хранение и переработка сельхозсырья*, (1), 57–65.

- Tkeshelashvili, M. E., Bobozhonova, G. A., & Sorokina, A. V. (2019). Development of protein-enriched confectionery products. *Storage and Processing of Farm Products*, (1), 57–65. (In Russ.)
- Фиалкова, Е. А., Куленко, В. Г., Шевчук, В. Б., Славорова, Е. В. (2015). Анализ влияния циклического режима работы кристаллизатора с воздушным охлаждением и подогревом на скорость роста кристаллов. *Молочно-хозяйственный вестник*, (1), 87–95.
- Fialkova, E. A., Kulenko, V. G., Shevchuk, V. B., & Slavorosova, E. V. (2015). Analysis of the effect of the cyclic operation of a crystallizer with air cooling and heating on the growth rate of crystals. *MolochnokhozyaistvennyVestnik*, (1), 87–95. (In Russ.)
- Шохалова, В. Н., Кузин А. А., Дыкало Н. Я., Шохалов В. А., & Костюков Д. М. (2014) Нанофильтрация творожной сыворотки: теоретические и практические аспекты. *Молочная промышленность*, (11), 65–66.
- Shohalova, V. N., Kuzin, A. A., Dykalo, N. Ya., Shohalov, V. A., & Kostyukov, D. M. (2014). Nanofiltration of curds whey: Theoretical and practical aspects. *Dairy Industry*, (11), 65–66. (In Russ.)
- Шохалова, В. Н., Кузин, А. А., & Шохалов, В. А. (2016). Реологические характеристики смесей мороженого, содержащих НФ-концентраты творожной сыворотки. *Молочная промышленность*, (5), 66–68.
- Shokhalova, V. N., Kuzin, A. A., & Shokhalov, V. A. (2016). Rheological characteristics of ice cream mixtures containing NF-concentrates of curd whey. *Dairy Industry*, (5), 66–68. (In Russ.)
- Blinov, A. V., Nagdalian, A. A., Blinova, A. A., Gvozdenko, A. A., Raffa, V. V., Oboturova, N. P., Golik, A. B., Maglakelidze, D. G., Siddiqui, S. A., & Ibrahim, S. A. (2021). Investigation of the influence of Zinc-containing compounds on the components of the colloidal phase of milk. *Arabian Journal of Chemistry*, 14(7), 103–229. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2021.103229>
- Boutin R. (2005). Lactose: The forgotten sugar. Knechtel Laboratories.
- Darmali, C., Mansouri, S., Yazdanpanah, A., & Woo Meng, W. (2021). Cooling crystallization of lactose in the presence of whey protein and lactic acid impurities. *Journal of Food Engineering*, 311, 110729. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110729>
- Dincer, T. (2014). Sonocrystallisation of lactose in concentrated whey. *Ultrasonics Sonochemistry*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ultsonch.2014.03.03>
- Francis, L. H. (1971). *Treatment of whey* (US 3615664 C 19711026). Google Patents. <https://patents.google.com/patent/US3615664A/en>
- 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>
- McSweeney, P. L. H., Fox, P. F., & Kelly, A. L. (2022). Lactose, water, salts and vitamins. *Advanced Dairy Chemistry* (vol. 3: Volume 3: Lactose, water, salts and minor constituents). Springer Nature.
- Mimouni, A., Schuck, P., & Bouhallab, S. (2005). Kinetics of lactose crystallization and crystal size as monitored by refractometry and laser light scattering: effect of proteins. *Le Lait*, 85(4–5), 253–260. <https://doi.org/10.1051/lait:2005015>
- Pandalaneni, K., & Amamcharla, J. K. (2018). Evaluating the crystallization of lactose at different cooling rates from milk and whey permeates in terms of crystal yield and purity. *Journal of Dairy Science*, 101, 8805–8821. <https://doi.org/10.3168/jds.2018-14846>
- Prostomolotov, A. I., Verezub, N. A., Vasilyeva, N. A., & Voloshin, A. E. (2020). Hydrodynamics and mass transfer during the solution growth of the $K_2(\text{Co,Ni})(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ mixed crystals in the shapers. *Crystals*, 10, 982–994. <https://doi.org/10.3390/cryst10110982>
- Slivchenko, E. S., Samarskiy, A. P., Isaev, V. N., & Blinichev, V. N. (2017). Stability of supercooling solutions of crystallization systems in classical theory of new phase formation. *ChemChemTech*, 60(5), 88–93. <https://doi.org/10.6060/tcct.2017605.5427>
- Sunkesula, V. (2020). Development of methods to improve lactose recovery from permeate and drying characteristics of Greek Acid Whey [Unpublished dissertation]. *Electronic Theses and Dissertations*.
- Wijayasinghe, R., Bogahawaththa, D., Chandrapala, J., & Vasiljevic, T. (2020). Crystallization behavior and crystal properties of lactose as affected by lactic, citric, or phosphoric acid. *Journal of Dairy Science*, 103, 11050–11061. <https://doi.org/10.3168/jds.2020-18375>