



Научная статья

4.3.3 – Пищевые системы (технические науки)

УДК637.345

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.03.006



СКОРОСТЬ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ЛАКТОЗЫ В ПРОИЗВОДСТВЕ МОЛОЧНОГО САХАРА

Владимир Алексеевич Шохалов ¹, Анна Ивановна Гнездилова ²,
Вероника Николаевна Шохалова ³

^{1, 2} Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Вологодская государственная академия имени Н.В. Верещагина, Вологда, Молочное, Россия

³ Федеральное бюджетное учреждение здравоохранения «Центр гигиены и эпидемиологии в Вологодской области», Вологда, Россия

¹ v_shohalov@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0005-9276-4351>

² gnezdilova.anna@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5484-8291>

³ v-shohalova@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0005-9276-4351>

Аннотация. Из анализа литературы следует, что необходимо дальнейшее совершенствование кристаллизации лактозы, которая должна осуществляться с учетом теоретических обоснований. Одним из основных параметров, необходимых для разработки рационального режима охлаждения кристаллизата в производстве молочного сахара, является скорость кристаллизации. Поэтому целью работы явилось экспериментальное определение скорости кристаллизации лактозы в мелассе, полученной в условиях мембранной очистки исходного сырья. Объектом исследований явился модельный кристаллизат, полученный из мелассы и кристаллов молочного сахара. Исследования проводились в диапазоне температур $t = 10\text{--}80\text{ }^{\circ}\text{C}$ с интервалом 10 град. В ходе исследований через определенные промежутки времени: 1, 2 и 6 часов измерялись массовая доля сухих веществ и лактозы, а также средний линейный размер кристаллов. Доброкачественность межкристального раствора составила $D_6 = 58\text{--}83\%$. По полученным данным о количестве выкристаллизовавшейся лактозы, площади поверхности кристаллов и интервале времени рассчитывалась скорость кристаллизации. Энергия активации процесса кристаллизации составила 59,387 кДж/моль. Установлено, что зависимость скорости кристаллизации от температуры носит экспоненциальный характер. Полученное значение энергии активации свидетельствует о том, что комплекс несахаров, присутствующих в мелассах, препятствует кристаллизации лактозы. Установленную закономерность необходимо учитывать при разработке режима охлаждения кристаллизата в производстве молочного сахара.

Ключевые слова: молочный, лактоза, меласса, кристалл, скорость кристаллизации, пересыщение, кристаллизат, межкристальный раствор.

Благодарности: авторы выражают благодарность за финансовую поддержку исследования Правительству Вологодской области.

Для цитирования: Шохалов В. А., Гнездилова А. И., Шохалова В. Н. Скорость кристаллизации лактозы в производстве молочного сахара // Ползуновский вестник. 2025. № 3, С. 39–44. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.03.006. EDN: <https://elibrary.ru/LJHANN>.

Original article

CRYSTALLISATION RATE OF LACTOSE IN MILK SUGAR PRODUCTION

Vladimir A. Shokhalov ¹, Anna I. Gnezdilova ², Veronika N. Shokhalova ³

^{1, 2} Federal State Budgetary Education Institution of Higher Education the Vereshchagin State Dairy Farming Academy of Vologda, Vologda, Molochnoye, Russia

³ Vologda State Center of Hygieneology of Epidemiology, Vologda, Russia

¹ v_shohalov@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0005-9276-4351>

² gnezdilova.anna@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5484-8291>

³ v-shohalova@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0005-9276-4351>

Abstract. From the analysis of literature, it follows that further improvement of lactose crystallisation is necessary, which should be carried out taking into account theoretical justifications. One of the main parameters necessary for the development of a rational mode of crystallisate cooling in the production of milk sugar is the crystallisation rate. Therefore, the aim of the work was to experimentally determine the crystallisation rate of lactose in

© Шохалов В. А., Гнездилова А. И., Шохалова В. Н., 2025

molasses obtained under conditions of membrane purification of feedstock. The object of research was a model crystallisate obtained from molasses and milk sugar crystals. The studies were carried out in the temperature range $t=10-80^{\circ}\text{C}$ with an interval of 10 degrees centigrade. During the studies at intervals of 1, 2 and 6 hours the mass fraction of solids and lactose, as well as the average linear size of crystals were measured. The benignity of the intercrystalline solution was $Db=58-83\%$. From the data obtained on the amount of crystallised lactose, crystal surface area and time interval, the crystallisation rate was calculated. The activation energy of the crystallisation process was 59.387 kJ/mol . The dependence of crystallisation rate on temperature has been found to be exponential in nature. The obtained value of activation energy indicates that the complex of non-sugars present in molasses prevents lactose crystallisation. The established regularity should be taken into account when developing the crystallisate cooling regime in milk sugar production.

Keywords: lactic, lactose, molasses, crystal, rate of crystallisation, supersaturation, crystallisate, intercrystalline solution.

Acknowledgements: the author expresses thanks for the financial support of the research to the Government of the Vologda Oblast.

For citation: 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). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.03.006. EDN: <https://elibrary.ru/LJHANN>.

ВВЕДЕНИЕ

Кристаллизация является одной из важнейших стадий в производстве молочного сахара как по традиционной, так и по интенсивной технологиям. Режим организации и проведения процесса кристаллизации в значительной степени предопределяют потери лактозы, выход и качество готового продукта. Известны различные способы осуществления технологий очистки сырья и проведения кристаллизации [1–8].

Однако известные технологии требуют дальнейшего совершенствования в отношении выхода и качества готового продукта. Так, например, недостатком традиционной технологии являются высокие потери лактозы. Основные потери (75 %) имеют место на стадии кристаллизации и обусловлены они как причинами несовершенства режима охлаждения, так и причинами мелассообразования. Причины мелассообразования довольно подробно изложены в работе [9].

Основными недостатками в производстве молочного сахара, за исключением высоких потерь лактозы в мелассе, также является:

- образование большого количества мелких и неравномерных кристаллов;
- комкование кристаллизата и затруднение разделения кристаллов от межкристалльного раствора при центрифугировании.

В производстве молочного сахара по интенсивной технологии кристаллизацию осуществляют после сгущения в вакуум-выпарном аппарате перед сушкой. Задачей является получение равномерных однородных кристаллов, что позволяет исключить слеживаемость и комкование готового продукта, а, следовательно, гарантировать его хранимоустойчивость [10].

Чтобы исключить указанные выше недостатки, необходимо кристаллизацию проводить в соответствии с определенным режимом [11]. Обычно кристаллизацию осуществляют в аппаратах с определенной скоростью и продолжительностью охлаждения [12].

Анализ научных исследований по кристаллизации показал, что кристаллизат в начале и в конце процесса охлаждения должен иметь определенную массовую долю сухих веществ, лактозы и доброкачественность [13].

При традиционной технологии производства молочного сахара сырье после очистки и сгущения поступает на кристаллизацию лактозы, которая осуществляется в соответствии с медленным или ускоренным режимом охлаждения [14].

Известны другие режимы охлаждения, позволяющие повысить выход молочного сахара и улучшить его качество [15]. Например, известен способ получе-

ния молочного сахара [16], включающий глубокую очистку молочной сыворотки, которая достигается за счет ультрафильтрации, нанофильтрации и электродиализного обессоливания. Затем проводят сгущение в вакуум-выпарном аппарате до 60–65 % сухих веществ, кристаллизацию лактозы из пересыщенных сиропов, промывку водой с температурой 5–6 °С, отделение кристаллов лактозы до влажности 7–10 %, сушку и охлаждение. Недостатками данной технологии является применение энергоемкого оборудования электродиализной установки.

Авторами [17] предусмотрено полное исключение из технологической цепочки производства молочного сахара электродиализа и повышение уровня деминерализации лактозосодержащего сырья за счет нанофильтрации (в комбинации с диафильтрацией) до значений 70–90 %. Технологический процесс производства молочного сахара предусматривает ультрафильтрацию обезжиренного молока, нанофильтрацию, сгущение, кристаллизацию, отделение кристаллов от маточного раствора их промывку и сушку. Данная технология позволяет получить продукт высокого качества.

При реализации интенсивной технологии производства молочного сахара с использованием мембранных методов очистки сырья при проведении кристаллизации лактозы перед сушкой также используются различные режимы охлаждения.

Для совершенствования процесса производства молочного сахара наряду с ультрафильтрацией и электродиализом широко используется нанофильтрация. Таким образом получают доброкачественность раствора 0,955–0,974, который затем сгущают и далее направляют на поточную кристаллизацию с темпом охлаждения 1,5–2,0 °С/мин [18–19]. Это обеспечивает высокую однородность кристаллов, низкую гигроскопичность сухого продукта, максимальное количество кристаллизованной лактозы.

Из вышеизложенного следует, что, несмотря на многообразие известных способов совершенствования кристаллизации лактозы, необходима разработка новых режимов, которая должна осуществляться с учетом теоретических обоснований.

Кристаллизация, как известно, включает несколько стадий, первой из них является зародышеобразование, затем происходит рост образовавшихся центров кристаллизации [20]. Если скорость первой стадии преобладает, что имеет место при высоких пересыщениях, то образуется достаточно много мелких кристаллов. Если скорость роста выше, то обра-

СКОРОСТЬ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ЛАКТОЗЫ В ПРОИЗВОДСТВЕ МОЛОЧНОГО САХАРА

зуются более крупные и равномерные кристаллы. Таким образом, было высказано предположение, что управлять гранулометрическим составом возможно за счет изменения скорости кристаллизации. Интенсивное охлаждение способствует, например, росту пересыщения и ускоряет процесс зародышеобразования и кристаллизации в целом. Для совершенствования процесса кристаллизации лактозы необходимо оптимизировать режим охлаждения, а для этого необходимо знать скорость кристаллизации лактозы.

Скорость кристаллизации лактозы широко исследовалась в чистых водных растворах или в присутствии отдельных несахаров [21–26], а также в мелассах, полученных в производстве молочного сахара из сыворотки, очищенной термическим или физико-химическим способом [27]. Однако особенностью современных технологий является мембранная очистка сыворотки и, следовательно, специфический состав несахаров в межкристальном растворе (мелассе), которые существенно влияют на процесс кристаллизации [28].

В этой связи целью данного исследования явилось экспериментальное определение скорости кристаллизации лактозы в мелассе, полученной в условиях мембранной очистки исходного сырья – молочной сыворотки.

МЕТОДЫ

Объектом исследований явился модельный кристаллизат молочного сахара, полученный из мелассы и кристаллов молочного сахара.

В межкристальном растворе (мелассе) определялась массовая доля сухих веществ рефрактометрическим способом и лактозы на поляриметре Atago AP-300, обеспечивающем измерение в международных сахарных градусах (°S) при длине волны $\lambda = 589$ нм. В твердой фазе измерялся средний размер кристаллов с помощью микроскопа OLYMPUS CX31 в комплекте с цифровой камерой DMC 18MPU3. Оценка гранулометрического состава осуществлялась из выборки 100 кристаллов микроскопическим методом по ГОСТ 33567.

Таблица 1 – Параметры кристаллизации лактозы

Table 1 – Lactose crystallisation parameters

Параметры	Массовая доля сухих веществ, СВ, %, абсолютная погрешность $\pm 0,05$	Массовая доля лактозы, Л, %, абсолютная погрешность $\pm 0,01$	Доброкачественность Дб, %	Средний размер кристаллов, l , мкм
$T = 80$ °C				
1. $\Delta t = 0$	56,5	47,0	83,2	597 $\pm$ 15
2. $\Delta t = 1$ ч.	55,3	39,4	71,2	668 $\pm$ 18
$t = 70$ °C				
1. $\Delta t = 0$	56,2	46,0	81,9	597 $\pm$ 15
2. $\Delta t = 1$ ч.	55,8	40,8	73,1	662 $\pm$ 17
$t = 60$ °C				
1. $\Delta t = 0$	41,5	32,7	79,0	597 $\pm$ 15
2. $\Delta t = 2$ ч.	41,0	29,5	72,0	652 $\pm$ 17
$t = 50$ °C				
1. $\Delta t = 0$	39,7	31,0	78,1	597 $\pm$ 15
2. $\Delta t = 6$ ч.	37,4	27,4	73,3	708 $\pm$ 19
$t = 40$ °C				
1. $\Delta t = 0$	35,2	26,3	74,7	597 $\pm$ 15
2. $\Delta t = 6$ ч.	34,3	24,0	70,0	699 $\pm$ 17
$t = 30$ °C				
1. $\Delta t = 0$	31,1	21,2	68,4	597 $\pm$ 15
2. $\Delta t = 6$ ч.	30,6	19,8	64,7	694 $\pm$ 17
$t = 20$ °C				
1. $\Delta t = 0$	26,4	17,2	65,2	597 $\pm$ 15
2. $\Delta t = 6$ ч.	25,5	16,5	64,7	640 $\pm$ 16
$t = 10$ °C				
1. $\Delta t = 0$	25,8	15,2	58,9	597 $\pm$ 15
2. $\Delta t = 6$ ч.	25,5	14,9	58,4	664 $\pm$ 16

Методика эксперимента заключалась в следующем. Из отобранных образцов меласс был приготовлен модельный кристаллизат с массовой долей кристаллов 40 %. Полученный таким образом модельный кристаллизат помещают в установку, где осуществляется процесс перемешивания вращением проб со скоростью 2 об/мин при заданной температуре. В течение интервалов времени $\Delta t = 1, 2$ и 6 часов измерялись массовая доля сухих веществ и лактозы, а также средний линейный размер кристаллов. Интервалы времени устанавливались экспериментально. Исследования проводились в диапазоне температур $t = 10–80$ °C с интервалом 10 град. В конце процесса кристаллизации образцы отправлялись на центрифугирование для отделения кристаллов от межкристального раствора.

Опыты проводились в трехкратной повторности. Математическая обработка результатов проводилась с помощью пакета прикладных программ Microsoft Office 2019 и Statistica 8.0.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты эксперимента приведены в таблице 1.

По полученным экспериментальным данным была рассчитана скорость кристаллизации:

$$U = \frac{\Delta m}{\Delta t \cdot F} \quad (1)$$

где U – скорость кристаллизации, кг/м²·час;

Δm – масса выкристаллизовавшегося вещества, кг;

Δt – интервал времени, час;

F – площадь поверхности кристаллов, м².

Массу выкристаллизовавшейся лактозы определим из уравнения:

$$\Delta m = L_n - L_k \quad (2)$$

где L_n и L_k – массовая доля лактозы в начале и конце кристаллизации, кг на 100 кг кристаллизата, принимается по данным таблицы 1.

Площадь поверхности кристаллов:

$$F = \beta \cdot l^2 \frac{K}{q}, \quad (3)$$

где $\beta=2,5$ – поверхностный коэффициент формы [25];
 l – линейный размер кристаллов при заданной температуре, м;

K – масса кристаллов на 100 кг кристаллизата, К = 40 кг;

Масса одного кристалла:

$$q_i = \alpha \cdot \rho \cdot l_i^3, \quad (4)$$

где α – объемный коэффициент формы, $\alpha = 0,24$ [25];
 ρ – плотность кристаллов лактозы $\rho = 1545 \text{ кг/м}^3$;

Преобразуем (3) с учетом (4) и значений коэффициентов:

$$F = \frac{2,5 \cdot 40}{0,24 \cdot 1545 \cdot l} = \frac{0,270}{l}$$

Затем по уравнению (1) была рассчитана скорость кристаллизации лактозы при различных температурах.

Результаты расчета площади поверхности кристаллов и скорости кристаллизации приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Скорость кристаллизации лактозы

Table 2 – Rate of crystallisation of lactose

Температура, t, °C	Средний размер кристаллов, l, мкм	Площадь поверхности кристаллов, м ²	Скорость кристаллизации лактозы, U, 10 ⁴ кг/(м ² ·час)
80	632,5	427	177,986
70	629,5	429	121,212
60	624,5	432	37,037
50	652,5	414	14,493
40	648,0	417	9,193
30	645,5	418	5,742
20	618,5	437	2,670
10	631,0	428	1,168

Скорость кристаллизации была представлена также аналитически с помощью уравнения Аррениуса (5):

$$U = A \cdot e^{-\frac{E_a}{RT}}, \quad (5)$$

где A – предэкспоненциальный множитель;

E_a – энергия активации, Дж/моль.

По экспериментальным значениям скорости кристаллизации U были вычислены значения A и E_a в уравнении Аррениуса, которые составили 7,86 и 59387 Дж/моль соответственно.

Оценка адекватности данной математической модели опытным данным осуществлялась с помощью критерия Фишера и дала положительные результаты.

Как следует из таблицы 2 и уравнения (5), скорость кристаллизации возрастает с увеличением температуры и зависимость носит экспоненциальный характер. Это необходимо учитывать при реализации режима охлаждения кристаллизата в производстве молочного сахара.

Как следует из уравнения (5), энергия активации, равная 59,387 кДж/моль, при кристаллизации лактозы в растворах меласс значительно превышает ее значение, полученное по результатам исследований кристаллизации лактозы в чистых водно-лактозных растворах авторов А.Г. Шестова и К.К. Полянского. Так, например, для диапазона температур 303–343К в системе вода-лактоза энергия активации составила 11,3 кДж/моль [25]. Однако при кристаллизации лактозы с добавками белковых примесей концентрата натурального казеина (КНК) и концентрата структурирующего пищевого (КСП) энергия активации была выше, чем в системе вода-лактоза, и составила 36,54 и 42,77 кДж/моль соответственно [23]. Таким образом, из вышеизложенного следует, что комплекс несахаров, присутствующих в мелассах, препятствует кристаллизации лактозы.

ВЫВОДЫ

1. Скорость кристаллизации лактозы возрастает с увеличением температуры, и зависимость носит экспоненциальный характер в диапазоне температур $t = 10\text{--}80$ °C.

2. Комплекс несахаров, присутствующих в мелассах, препятствует кристаллизации лактозы.

3. Установленную закономерность необходимо учитывать при разработке режима охлаждения кристаллизата в производстве молочного сахара.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Информационное обеспечение наилучших доступных технологий пищевой промышленности / А.Г. Храмцов [и др.]. СПб. : ГИОРД, 2019. 312 с.
2. Храмцов А.Г. ЛАКТОМИКА – наука о молоке. Модернизация наших представлений // Молочная промышленность. 2011. № 6. С. 45–48.
3. Евдокимов И.А., Володин Д.Н., Золотарева М.С. Реальные мембранные технологии // Молочная промышленность. 2010. № 1. С. 49–50.
4. Евдокимов И.А., Володин Д.Н., Топалов В.К. (2011). Перспективы и особенности организации переработки сыворотки за рубежом и в России // Переработка молока. 2011. № 8. С. 6–8.
5. Теоретические и практические аспекты процесса кристаллизации лактозы в производстве молочного сахара. / А.И.Гнездилова [и др.] // Молочно-хозяйственный вестник. 2023. № 2. С. 128–140.
6. Эволюция переработки молочной сыворотки: прошлое, настоящее, будущее (часть 1) / А.Г. Храмцов [и др.] // Современная наука и инновации. 2021. № 2. С. 129–139.
7. The evolution of whey processing: past, present, future (part 2) / A.G. Khramtsov [and others] // Modern Science and Innovations. 2021. № 35(3). P. 126–139.
8. Храмцов А.Г. Феномен молочной сыворотки. СПб. : Профессия. 2011. 900с.
9. Гнездилова А.И. Технологические аспекты мелассообразования при кристаллизации лактозы // Молочнохозяйственный вестник. 2019. № 4(36). С. 155–164.
10. Huppertz T., Gazi I. Lactose in dairy ingredients: Effect on processing and storage stability // Journal Dairy Science. 2016. № 99(8). P. 6842–6851. doi. org/10.3168/jds.2015-10033.
11. Nijdam J., Ibach A., Eichhorn K., Kind M. An X-ray diffraction analysis of crystallised whey and whey-permeate powders // Carbohydrate Research. 2007. № 342(16). P. 2354–2364. doi. org/10.1016/j.carres. 2007.08.001.

12. Wong S.Y., Hartel R.W. (2014). Crystallization in lactose refining. A review // *Journal Food Science*. 2014. № 79(3). P. 257–272. doi. org/10.1111/1750-3841.12349.

13. Sánchez-García Yanira I., Gutiérrez-Méndez, Néstor, Orozco-Menab, Raúl E., Ramos-Sánchez, Víctor H., Leal-Ramos Martha Y. Individual and combined effect of pH and whey proteins on lactose crystallization // *Food Research International*. 2019. № 116. P. 455–461. doi. org/10.1016/j.foodres.2018.08.061.

14. Сборник технологических инструкций по производству молочного сахара. М. : Минмясо-молпром, 1980. 38 с.

15. Parimaladevi P., Srinivasan K. Influence of supersaturation level on the morphology of α -lactose monohydrate crystals // *International Dairy Journal*. 2014. № 39(2). P. 301–311. doi. org/10.1016/j.idairyj.2014.08.007.

16. Способ получения пористых таблеток молочного сахара и устройство для его осуществления: пат. 2661200 Рос. Федерация № 2017146547; заявл. 27.12.2017; опубл. 16.07.2018, Бюл. № 20. 11 с.

17. Способ производства молочного сахара: пат. 2735304 Рос. Федерация № 2019139888; заявл. 05.12.2019; опубл. 29.10.2020, Бюл. № 31. 6 с.

18. Способ получения молочного сахара с точной кристаллизацией лактозы: пат. 2658441 Рос. Федерация № 2017146544. заявл. 27.12.2017; опубл. 21.06.2018, Бюл. № 18. 8 с.

19. Способ производства молочного сахара: пат. 2683868 Рос. Федерация № 2018142314, заявл. 30.11.2018; опубл. 02.04.2019, Бюл. № 10. 7 с.

20. Фольмер, М. Кинетика образования новой фазы. М. : Наука, 1986. 204 с.

21. Храмов А.Г. Молочный сахар. М. : ВО Агро-промиздат, 1987. 223 с.

22. Bhargava A., Jelen P. Lactose solubility and crystal growth as affected by mineral impurities // *Journal Food Science*. 1996. № 61(1). P. 180–184. doi. org/10.1111/j.1365-2621.1996.tb14754.

23. Шохалов В.А. Разработка технологии консервированного молокосодержащего продукта с сахаром : дис. ... канд. техн. наук. Вологда, 2004. 149 с.

24. Smykov I., Gnezdilova A., Vinogradova Y., Muzykantova A., Lyamina A. 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*. 2019. № 25(6). P. 1–11. doi. org/10.1177/1082013219830494.

25. Полянский К.К., Шестов А.Г. Кристаллизация лактозы : физико-химические основы. Воронеж : Изд-во ВГУ, 1995. 185 с.

26. Гнездилова А.И. Развитие научных основ кристаллизации лактозы и сахарозы в многокомпонентных водных растворах: автореф. дис. ... д-ра. техн. наук. М., 2000. 46 с.

27. Кузнецова В.С. Нормирование параметров мелассы и расчет рационального режима кристаллизации лактозы: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Вологда, 1989. 17 с.

28. Wijayasinghe R., Bogahawaththa D., Chandrapala J., Vasiljevic T. Crystallization behavior and crystal properties of lactose as affected by lactic, citric, or phosphoric acid // *Journal Dairy Science*. 2020. № 103(12). P. 11050–11061. doi. org/10.3168/jds.2020-1835.

Информация об авторах

В. А. Шохалов – кандидат технических наук, доцент кафедры технологического оборудования Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования Вологодской государственной академии имени Н.В. Верещагина.

А. И. Гнездилова – доктор технических наук, профессор кафедры технологического оборудования Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования Вологодской государственной академии имени Н.В. Верещагина.

В. Н. Шохалова – кандидат технических наук, начальник отдела обеспечения лабораторной деятельности Федерального бюджетного учреждения здравоохранения «Центр гигиены и эпидемиологии в Вологодской области».

REFERENCES

1. Khramtsov, A.G., Bratsikhin, A.A., Borisenko, A.A., Borisenko, L.A., Evdokimov, I.A., Ryabtseva, S.A., Lodygin, A.D. & Borisenko, A.A. (2019). *Information support of the best available technologies of the food industry*. SPb. : GIOR. (In Russ.).

2. Khramtsov, A.G. (2011). Lactomics - the science of milk. Modernisation of our perceptions. *Dairy Industry*, (6), 45-48. (In Russ.).

3. Evdokimov, I.A., Volodin, D.N. & Zolotareva, M.S. (2010). Real membrane technologies. *Dairy Industry*, (1), 49-50. (In Russ.).

4. Evdokimov, I.A., Volodin, D.N. & Topalov, V.K. (2011). Prospects and peculiarities of organisation of whey processing abroad and in Russia. *Milk Processing*, (8), 6-8. (In Russ.).

5. Gnezdilova, A.I., Shokhalov, V.A., Vinogradova, Y.V. & Shokhalova, V.N. (2023). Theoretical and practical aspects of lactose crystallisation process in milk sugar production. *Molochnokhozhivny vestnik*, (2), 128-140. (In Russ.).

6. Khramtsov, A.G., Borisenko, A.A., Evdokimov, I.A., Borisenko, A.A., Bratsikhin, A.A. & Borisenko, L.A. (2021). Evolution of dairy whey processing: past, present, future (part 1). *Modern Science and Innovation*, (2), 129-139. (In Russ.).

7. Khramtsov, A.G., Borisenko, A.A., Evdokimov, I.A., Borisenko, A.A., Bratsikhin, A.A. & Borisenko, L.A. (2021). The evolution of whey processing: past, present, future (part 2). *Modern Science and Innovations*, 35(3), 126-139.

8. Khramtsov, A.G. (2011). *Phenomenon of dairy whey*. SPb. : Profession. (In Russ.).

9. Gnezdilova, A.I. (2019). Technological aspects of molasses formation during lactose crystallisation. *Molochnokhozyaystvenny vestnik*, 4(36), 155-164. (In Russ.).

10. Huppertz, T. & Gazi, I. (2016). Lactose in dairy ingredients: Effect on processing and storage stability. *Journal Dairy Science*, 99(8), 6842-6851. doi.org/10.3168/jds.2015-10033.

11. Nijdam, J., Ibach, A., Eichhorn, K. & Kind, M. (2007). An X-ray diffraction analysis of crystallised whey and whey-permeate powders. *Carbohydrate Research*, 342(16), 2354-2364. doi.org/10.1016/j.carres.2007.08.001.

12. Wong, S.Y. & Hartel, R.W. (2014). Crystallization in lactose refining. A review. *Journal Food Science*,

79(3), 257-272. doi.org/10.1111/1750-3841.12349.

13. Sánchez-García, Yanira I., Gutiérrez-Méndez, Néstor, Orozco-Menab, Raúl E., Ramos-Sánchez, Victor H. & Leal-Ramos Martha, Y. (2019). Individual and combined effect of pH and whey proteins on lactose crystallization. *Food Research International*, 116, 455-461. doi.org/10.1016/j.foodres.2018.08.061.

14. Collection of technological instructions for the production of milk sugar. (1989). Moscow : Minmyasomolprom. (In Russ.).

15. Parimaladevi, P. & Srinivasan, K. (2014). Influence of supersaturation level on the morphology of α -lactose monohydrate crystals. *International Dairy Journal*, 39(2), 301-311. doi.org/10.1016/j.idairyj.2014.08.007.

16. Evdokimov, I.A., Shramko, M.I., Anisimov, G.S., Khramtsov, A.G., Ryabtseva, S.A., Serov, A.N. & Darzhania, B.A. (2018). Metod for producing porous tablets of milk sugar and device for its implementation. *Pat. 2661200. Russian Federation, published on 16.07.2018. Bull. No. 20. (In Russ.).*

17. Shkola, S.S., Dykalo, N.Y., Anisimov, G.S., Evdokimov, I.A., Kravtsov, V.A., Akhmedova, V.R., Martak, A.A. & Metel, V.S. (2020). Milk sugar production method. *Pat. 2735304. Russian Federation, published on 29.10.2020. Bull. No. 31. (In Russ.).*

18. Evdokimov, I.A., Shramko, M.I., Anisimov, G.S., Khramtsov, A.G., Ryabtseva, S.A., Kulikova, I.K., Kravtsov, V.A. & Metel, V.S. (2018). Metod for obtaining milk sugar with lactose flow crystallization. *Pat. 2658441. Russian Federation, published on 21.06.2018. Bull. No. 18. (In Russ.).*

19. Anisimov, G.S., Dykalo, N.Y., Shkola, S.S. & Kravtsov, V.A. (2019). Milk sugar production method. *Pat. 2683868. Russian Federation, published on 02.04.2019. Bull. No. 10. (In Russ.).*

20. Vollmer, M. (1986). *Kinetics of new phase formation*. M.: Nauka. (In Russ.).

21. Khramtsov, A.G. (1987). *Milk sugar*. M.VO Agropromizdat. (In Russ.).

22. Bhargava, A. & Jelen, P. (1996). Lactose solubility and crystal growth as affected by mineral impurities.

Journal Food Science, 61(1), 180-184. doi.org/10.1111/j.1365-2621.1996.tb14754.

23. Shokhalov, V.A. (2004). Development of the technology of the preserved milk-containing product with sugar : Cand. of Technical Sciences. Vologda. (In Russ.).

24. 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. doi.org/10.1177/1082013219830494. (In Russ.).

25. Polyansky, K.K. & Shestov, A.G. (1995). *Crystallisation of lactose: physicochemical bases*. Voronezh: Izd.VGU. (In Russ.).

26. Gnezdilova, A.I. (2000). Development of scientific bases of crystallisation of lactose and sucrose in multicomponent aqueous solutions. Extended abstract of Doctors thesis. Moscow. (In Russ.).

27. Kuznetsova, V.S. (1989). Norming of molasses parameters and calculation of rational mode of lactose crystallisation. Extended abstract of candidates thesis. Vologda. (In Russ.).

28. 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 Dairy Science*, 103(12), 11050-11061. doi.org/10.3168/jds.2020-1835.

Information about the authors

V.A. Shokhalov - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Technological Equipment Chair of the Vereshchagin State Dairy Farming Academy of Vologda.

A.I. Gnezdilova - Doctor of Technical Sciences, Professor of the Technological Equipment Chair of the Vereshchagin State Dairy Farming Academy of Vologda.

V.N. Shokhalova - Candidate of Technical Sciences, Head of the department of the Vologda State Center of Hygieneology of Epidemiology.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 07 июня 2024; одобрена после рецензирования 24 июня 2025; принята к публикации 10 июля 2025.

The article was received by the editorial board on 07 June 2024; approved after editing on 24 June 2025; accepted for publication on 10 July 2025.