

УДК 637.1/3.(045)

## КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ ЛАКТОЗЫ МОЛОЧНОЙ СЫВОРОТКИ В ПОТОКЕ

С.А. БРЕДИХИН<sup>1</sup>, А.С. БРЕДИХИН<sup>2</sup>, В.В. ЧЕРВЕЦОВ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева;  
<sup>2</sup>ООО «КЛЭКС»; <sup>3</sup>ГНУ ВНИМИ

*Статья посвящена экспериментальному исследованию закономерностей кристаллизации лактозы молочной сыворотки в потоке. Экспериментально исследованы закономерности изменения температуры массовой кристаллизации лактозы и определено количество лактозы, перешедшей в кристаллическое состояние. Установлено влияние частоты вращения рабочих органов роторно-пульсационного аппарата непрерывного действия на количество образующихся кристаллов лактозы и их средний размер при кристаллизации лактозы в сгущенной до 60% содержания сухих веществ молочной подсырной сыворотке в трехсекционном скребковом пластинчатом теплообменнике непрерывного действия. Получены экспериментальные данные о влиянии температуры нагревания на средний размер кристаллов лактозы.*

**Ключевые слова:** молочная сыворотка, кристаллизация лактозы, кристаллы лактозы, теплообменник непрерывного действия, массовая кристаллизация лактозы, лактозное число.

Кристаллизация лактозы молочной сыворотки – один из основных технологических процессов производства молочного сахара. Увеличение объемов производства молочного сахара и его производных повышает актуальность исследований, направленных на изучение процесса кристаллизации лактозы.

Кристаллизацию лактозы в молочной сыворотке в настоящее время осуществляют в основном в аппаратах периодического действия. Это снижает качество процесса кристаллизации, которое зависит от возможности его автоматизации, управляемости и обеспечения однородной дисперсности кристаллов. Техническая реализация кристаллизации в аппаратах непрерывного действия позволяет добиваться устранения большей части этих недостатков [2, 3, 4].

Поточная кристаллизация лактозы в молочной сыворотке развивается в сложных гидродинамических условиях и широком температурном диапазоне. Реализация кристаллизации лактозы молочной сыворотки в потоке в аппаратах непрерывного действия позволяет сократить энергозатраты, уменьшить производственные площади и металлоемкость используемого оборудования периодического действия, добиться получения однородной дисперсности кристаллов лактозы, размер которых в 3-4 раза меньше, чем при кристаллизации в аппаратах периодического действия [5].

Кристаллизацию лактозы молочной сыворотки исследовали в 3-секционном скребковом пластинчатом теплообменнике непрерывного действия (СПТНП) на основе кинетики температурных изменений сгущенной молочной сыворотки с массовой долей сухих веществ 50-60%. Общий методический подход к выполнению экспериментов состоял в изучении влияния температуры охлаждения на кристаллизацию лактозы сгущенной молочной сыворотки во взаимосвязи с температурой хладоносителя и площадью теплопередачи аппарата; определении температуры массовой кристаллизации лактозы, количества лактозы, перешедшей в кристаллическое состояние, а также в исследовании влияния частоты вращения рабочих органов роторно-пульсационного аппарата (далее – РПА) на количество образующихся кристаллов лактозы и их средний размер.

РПА представляет собой дисковый обработчик, привод которого имеет частотный преобразователь. Рабочие органы РПА состоят из набора подвижных и неподвижных дисков. Подвижные диски снабжены выступами со специальными проточками, обеспечивающими кавитационный режим течения. Перед дисковым обработчиком в поток сыворотки через струйный смеситель насосом-дозатором впрыскивается взвесь затравки, которая дисковым обработчиком равномерно распределяется по всему объему сыворотки, при этом подвергая ее интенсивному гидродинамическому воздействию.

При выполнении экспериментальных исследований использованы стандартизованные методы ГОСТ 3626-73, ГОСТ 29246-91, ГОСТ 30305.1-95. Линейные размеры кристаллов лактозы, количество кристаллов лактозы в исследуемых образцах сгущенной молочной сыворотки определяли микроскопированием с применением поляризационно-интерференционного микроскопа высокой разрешающей способности BIOLAR с иммерсионным объективом 40 крат и видеоокулярном НВ-35 с разрешением 240x320 совместно с персональным компьютером и программным обеспечением «Микро-Анализ Pro». Значения линейных размеров и количества кристаллов сгущенной молочной сыворотки выводились в таблицу Microsoft Excel.

Результаты экспериментальных исследований обрабатывали методами математической статистики [1, 11, 13, 15]. Доверительная вероятность результатов математической обработки данных физико-химического анализа была не ниже 0,95, а вероятность результатов технологического эксперимента – 0,90. Статистическая обработка экспериментальных данных проводилась с применением методов регрессионного анализа с использованием прикладного программного обеспечения Microsoft Excel, «MatCad», «CurveExpert», «MatLab», «Микро-Анализ Pro» и др.

Для определения температуры массовой кристаллизации лактозы в сгущенной молочной сыворотке был проведен комплекс исследований по определению доброкачественности молочной сыворотки, массовой доли лактозы в сгущенной молочной сыворотке и лактозного числа.

Массовая кристаллизация лактозы в сгущенной молочной сыворотке представляет собой явление одновременного образования большого числа кристаллов из пересыщенного раствора [6]. Под температурой массовой кристаллизации лактозы в сгущенной молочной сыворотке понимают значение температуры, при которой происходит данное явление.

Определяющим показателем качества лактозосодержащего сырья является содержание лактозы, которое трактуется как доброкачественность (ДБ) или чистота (Ч) и определяется из соотношения

$$ДБ = (Л/С_{св}) 100, \quad (1)$$

где ДБ – доброкачественность молочной сыворотки, %; Л – массовая доля лактозы в сгущенной молочной сыворотке, %; С<sub>св</sub> – массовая доля сухих веществ в сгущенной молочной сыворотке, %.

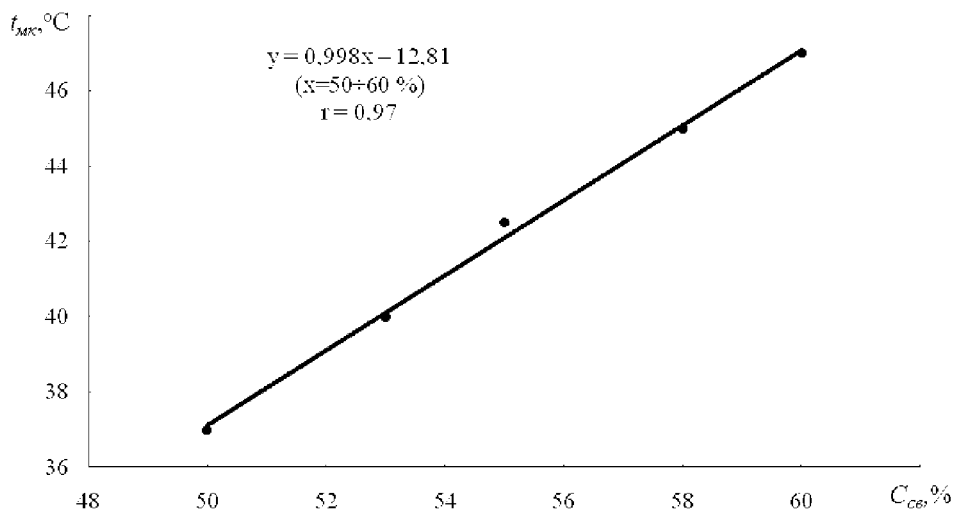
Доброкачественность традиционного лактозосодержащего сырья изменяется от высоких, приходящихся на мелассу рафинированного молочного сахара (85,6%), до низких значений, характерных для соленой сыворотки (44,6%) и образующейся при ее использовании мелассы (50,8%). Все остальные виды сырья имеют доброкачественность на уровне подсырной и казеиновой сыворотки (64,6-78,5%) [10, 12]. Доброкачественность сгущенной молочной сыворотки на основе анализа результатов исследования и рекомендаций [8] составила 70%.

Массовую долю лактозы определяли из формулы (1). По полученному значению массовой доли лактозы в сгущенной молочной сыворотке определяли лактозное число по формуле [14]:

$$L_{\text{ак.ч}} = (L/W)100, \quad (2)$$

где  $L_{\text{ак.ч}}$  – лактозное число, %;  $L$  – массовая доля лактозы в сгущенной молочной сыворотке, %;  $W$  – массовая доля воды в сгущенной молочной сыворотке, %.

По значению лактозного числа и графических зависимостей [9] определяли температуру массовой кристаллизации лактозы в сгущенной молочной сыворотке в исследованных диапазонах массовой доли сухих веществ. Более точно температуру массовой кристаллизации лактозы определяют по критерию метастабильности на основе данных о вязкости продукта и растворимости лактозы в присутствии сахарозы [7]. Зависимость температуры массовой кристаллизации лактозы от массовой доли сухих веществ в сгущенной молочной сыворотке показана на рисунке 1.



**Рис. 1.** Зависимость температуры массовой кристаллизации лактозы в молочной сыворотке от массовой доли сухих веществ

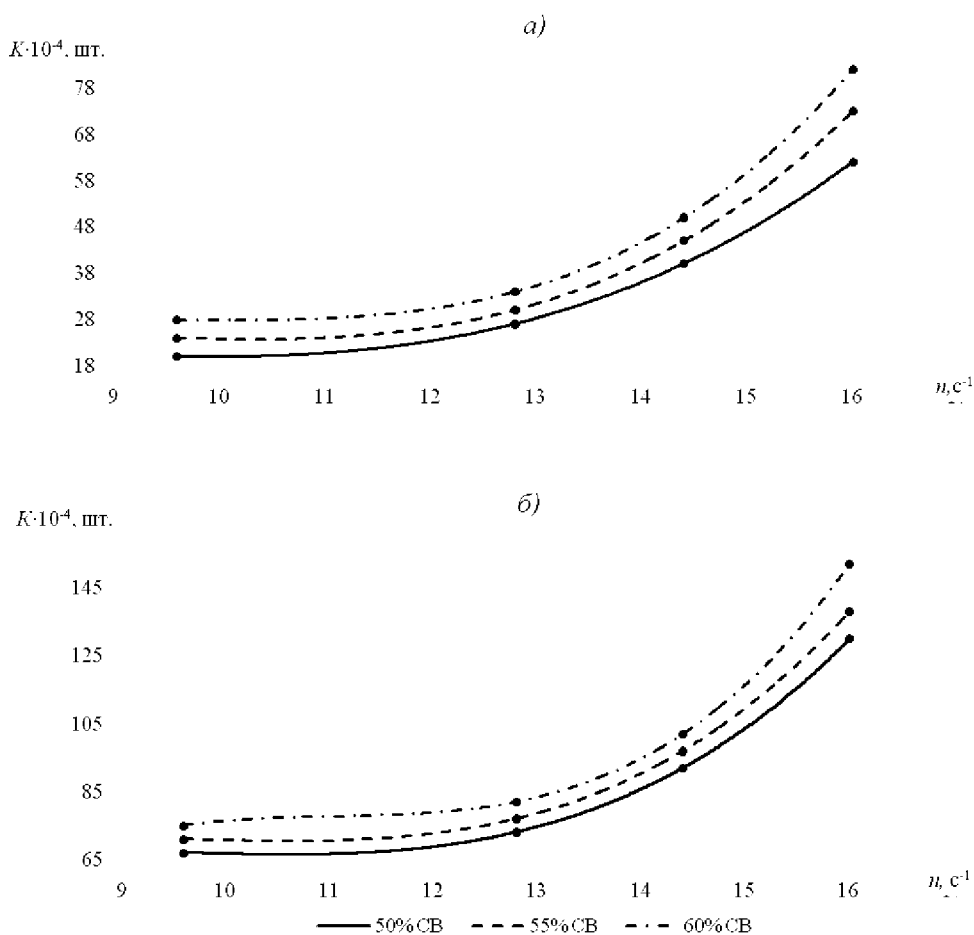
Для определения количества лактозы, перешедшей в кристаллическое состояние, брали пробы из начального и конечного раствора сгущенной молочной сыворотки. Далее по значениям начальной и конечной массовой доли лактозы в сгущенной мо-

лочной сыворотке определяли количество лактозы, перешедшей в кристаллическое состояние по формуле [14]:

$$L_{кр} = \frac{100 \cdot (L_{нач} - L_{кон})}{100 - L_{кон}}, \quad (3)$$

где  $L_{нач}$  – начальная массовая доля лактозы в сгущенной молочной сыворотке, %;  $L_{кон}$  – конечная массовая доля лактозы в сгущенной молочной сыворотке, %.

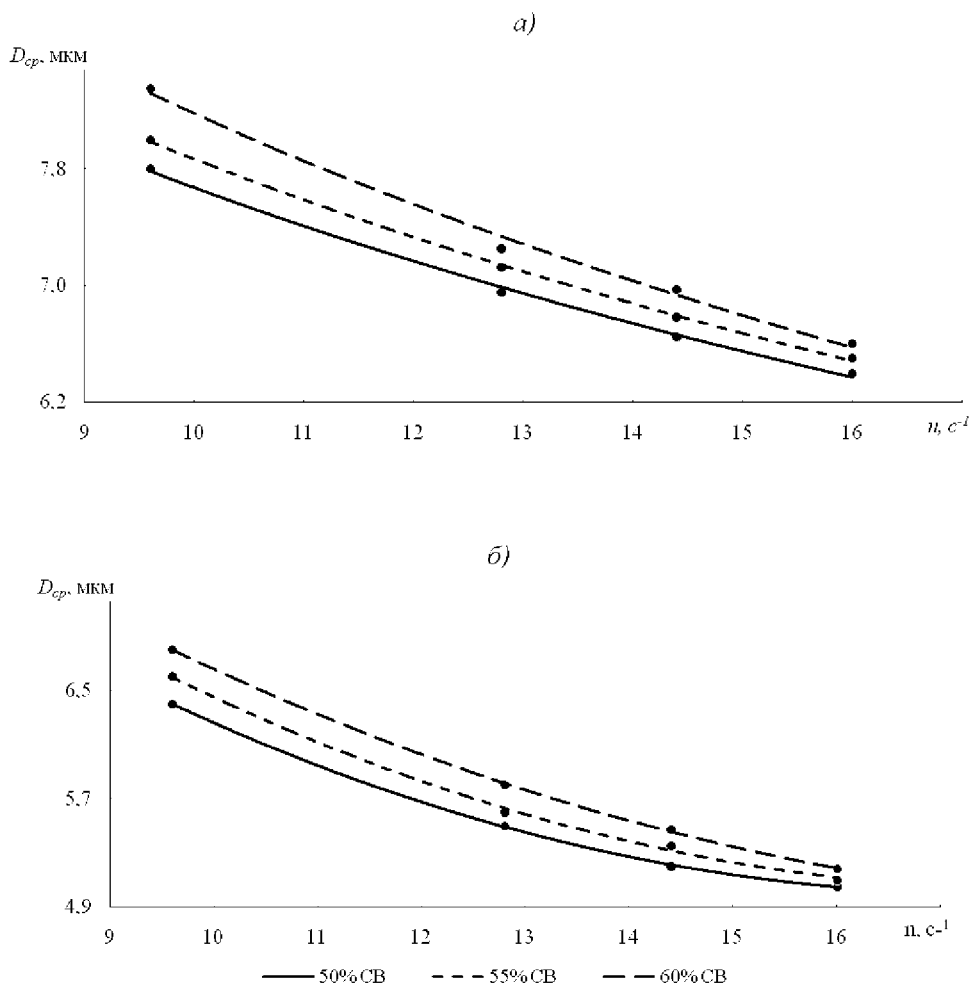
Авторами проведено исследование влияния частоты вращения рабочих органов роторно-пульсационного аппарата (РПА) на количество образующихся кристаллов и их средний размер при кристаллизации лактозы в сгущенной до 60% содержания сухих веществ молочной подсырной сыворотке в трехсекционном СПТНП. Частота вращения рабочих органов РПА в процессе исследований изменялась от  $9,6 \text{ с}^{-1}$  до  $16 \text{ с}^{-1}$ .



**Рис. 2.** Зависимость количества кристаллов в сгущенной до 50-60% сухих веществ (СВ) молочной сыворотке от частоты вращения рабочих органов РПА: а) после РПА; б) на выходе из II секции СПТНП

Анализ результатов опытов показывает, что в обоих случаях (рис. 2) при увеличении частоты вращения рабочих органов РПА увеличивается и количество кристаллов. В сгущенной молочной сыворотке, взятой после из пробоотборника, после РПА количество кристаллов в 1,5 раза меньше, чем на выходе из II секции СПТНП. Это обусловлено тем, что во II секции СПТНП сгущенная молочная сыворотка подвергается дальнейшему охлаждению и продолжению кристаллизации.

Исследовано также влияние частоты вращения рабочих органов РПА на средний размер кристаллов. Результаты влияния частоты вращения рабочих органов РПА на средний размер кристаллов ( $D_{cp}$ ) в сгущенной молочной сыворотке представлены на рисунке 3.



**Рис. 3.** Зависимость среднего размера кристаллов в сгущенной молочной сыворотке от частоты вращения рабочих органов РПА: а) после РПА; б) на выходе из II секции СПТНП

Анализ опытов показывает, что с увеличением частоты вращения рабочих органов РПА очевидно уменьшение среднего размера кристаллов лактозы при разной массовой доле сухих веществ молочной сыворотки. При прохождении через РПА при частоте вращения от  $9,6 \text{ с}^{-1}$  до  $16 \text{ с}^{-1}$  средний размер кристаллов уменьшается от 8,3 мкм до 6,6 мкм при массовой доле сухих веществ 60%. Дальнейшее уменьшение среднего размера кристаллов во второй секции СПТП происходит за счет быстрого охлаждения сгущенной молочной сыворотки при температуре от  $37^\circ\text{C}$  до  $12^\circ\text{C}$ . Средний размер кристаллов лактозы за время нахождения во второй секции уменьшается от 6,6 мкм до 5,2 мкм. Температура является одним из важных параметров, влияющих как на образование кристаллов лактозы в сгущенной молочной сыворотке, так и на их растворимость.

Исследовано влияние температуры на количество лактозы, перешедшей в кристаллическое состояние, и на средний размер кристаллов. Определено, что при увеличении температуры количество лактозы, перешедшей в кристаллическое состояние, становится значительно меньше. Это обусловлено тем, что при нагревании кристаллы растворяются. Результаты исследований зависимости количества лактозы, перешедшей в кристаллическое состояние, от температуры с внесением затравки и без нее показали, что разница значений минимальна. Полученные результаты позволяют сделать практический вывод о том, что нет необходимости вносить затравку, и это экономически важно для проведения процесса кристаллизации в промышленных условиях.

Изучение влияния температуры нагревания на средний размер кристаллов показало, что при увеличении температуры нагревания средний размер кристаллов становится значительно меньше. Это можно объяснить тем, что в процессе нагревания кристаллы растворяются и, соответственно, размер кристаллов становится меньше. Показано, что нагрев сыворотки после кристаллизации в ней лактозы (при температуре  $12^\circ\text{C}$ ) до температуры  $35\text{-}38^\circ\text{C}$  приводит к уменьшению размеров кристаллов в среднем с 6,6 мкм до 5,2 мкм. Это позволяет сделать вывод о том, что перед сушкой сыворотку можно предварительно подогреть до  $40\text{-}45^\circ\text{C}$  без существенного влияния температуры нагрева на средний размер кристаллов лактозы.

Таким образом, проведено экспериментальное исследование закономерностей кристаллизации лактозы молочной сыворотки в потоке. Определено изменение температуры массовой кристаллизации лактозы и количество лактозы, перешедшей в кристаллическое состояние. Установлено влияние частоты вращения рабочих органов роторно-пульсационного аппарата непрерывного действия на количество образующихся кристаллов лактозы и их средний размер. Получены экспериментальные данные о влиянии температуры нагревания на средний размер кристаллов лактозы. Полученные результаты могут быть использованы для совершенствования современной технологии сухой молочной сыворотки.

### Библиографический список

1. Адлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976. 280 с.
2. Бредихин С.А. Технологическое оборудование предприятий молочной промышленности. М.: Колос, 2010. 408 с.

3. Бредихин С.А., Бредихин А.С., Жуков В.Г., Космодемьянский Ю.В., Якушев А.О. Процессы и аппараты пищевой технологии. СПб.: Издательство Лань, 2014. 544 с.
4. Бредихин С.А. Технологическое оборудование переработки молока. СПб.: Издательство Лань, 2015. 416 с.
5. Бредихин А.С., Бредихин С.А., Червецов В.В. Аналитические исследования охлаждения молочной сыворотки в потоке // Известия ТСХА. № 4. М., 2013. С. 119-127.
6. Волкова Т.А., Кравченко Э.Ф., Терлоев Х.Ю. Кристаллизация лактозы: Обзорная информация / Т.А. Волкова, Э.Ф. Кравченко, Х.Ю. Терлоев. М.: АгроНИИТЭИММП, 1994. 28 с.
7. Гиббс Д.В. Термодинамические работы. М.-Л.: Гостехориздат, 1950. 492 с.
8. Гнездилова А.И., Липатов Н.Н., Кузнецова В.С., Куленко В.Г. Физико-химические и теплофизические свойства основных видов пищевых продуктов: Учебное пособие. Вологда-Молочное: ИЦ ВГМХА, 2007. 101 с.
9. Голубева Л.В., Чекулаева Л.В., Полянский К.К. Хранимоспособность молочных консервов. М.: ДеЛиПринт, 2001. 115 с.
10. Павлов В.А. Новые методы переработки молочной сыворотки. М.: Росагропромиздат, 1990. 150 с.
11. Самарский А.А. Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры. 2-е изд., испр. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. 320 с.
12. Синельников Б.М. Лактоза и ее производные. СПб.: Профессия, 2007. 768 с.
13. Фетисов Е.А. Статистические методы контроля качества молочной продукции: Справочное руководство. М.: Агропромиздат, 1985. 80 с.
14. Фиалкова Е.А., Евдокимов И.А., Куленко В.Г., Качалова Е.А., Костюков Е.М. Теория роста кристаллов лактозы в зависимости от их размеров // Сб. материалов Международного научно-технического семинара «Современные направления переработки сыворотки». Ставрополь: НОУ «Образовательный научно-технический центр молочной промышленности», 2006. С. 57-58.
15. <http://www.statsoft.ru>: «Планирование эксперимента».

## WHEY LACTOSE CRYSTALLIZATION IN THE STREAM

S.A. BREDIKHIN<sup>1</sup>, A.S. BREDIKHIN<sup>2</sup>, V.V. CHERVETSOV<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Russian State Agrarian University named after K.A. Timiryazev;

<sup>2</sup> LLC «KLEKS»;

<sup>3</sup>All-Russia Research Institute of Dairy Industry

*The article is concentrated on experimental study of regularities of whey lactose crystallization in a stream. Changes of temperature of mass lactose crystallization are experimentally investigated and the number of lactose which became crystallized is determined. Influence of frequency of working bodies rotation in the rotor-pulsation device of continuous action is installed on a number of formed lactose crystals and their average size during lactose crystallization in thickened product to 60% of solids in serum in the three-section scraper lamellar heat exchanger of continuous action. Experimental data are received about the influence of heating temperature on the average size of lactose crystals.*

**Key words:** milk whey, lactose crystallization, lactose crystals, continuous heat exchanger, mass lactose crystallization, lactose number.

## Resources

1. *Adler Yu.P.* Planirovanie eksperimenta pri poiske optimalnykh usloviy. M.: Nauka, 1976. 280 p.
2. *Bredikhin S.A.* Tehnologicheskoe oborudovanie predpriyatiy molochnoy promyshlennosti. M.: Kolos, 2010. 408 p.
3. *Bredikhin S.A., Bredikhin A.S., Zhukov V.G., Kosmodemyanskiy Yu.V., Yaushev A.O.* Protsessy i apparaty pishchevoy tehnologii. Spb.: Izdatelstvo Lan', 2014. 544 p.
4. *Bredikhin S.A.* Tehnologicheskoe oborudovanie pererabotki moloka. Spb.: Izdatelstvo Lan', 2015. 416 p.
5. *Bredikhin A.S., Bredikhin S.A., Chvetsov V.V.* Analiticheskie issledovaniya ohlazhdeniya molochnoy syvorotki v potoke // *Izvestiya TSHA*. № 4. 2013. Moskva. P. 119-127.
6. *Volkova T.A., Kravchenko E.F., Terloev Kh.Yu.* Kristalizatsiya laktozy / T.A. Volkova, E.F. Kravchenko, Kh. Yu. Terloev. M.: AgroNIITEIMMP, 1994. 28 p.
7. *Gibbs D.V.* Termodinamicheskie raboty. M.-L.: Gostehorizdat, 1950. 492 p.
8. *Gnezdilova A.I., Lipatov N.N., Kuznetsova V.S., Kulenko V.G.* Fiziko-himicheskie i teplofizicheskie svoystva osnovnykh vidov pishchevykh productov: uchebnoe posobie s grifom UMO. Vologda–Molochnoe: IZ VGMHA, 2007. 101 p.
9. *Golubeva L.V., Chekulaeva L.V., Polyanskiy K.K.* Khranimosposobnost molochnykh konservov. M.: DeLiprint, 2001. 115 p.
10. *Pavlov V.A.* Novye metody pererabotki molochnoy syvorotki. M.: Rosagropromizdat, 1990. 150 p.
11. *Samarskiy A.A.* Matematicheskoe modelirovanie: Idei. Metody. Primery. 2-e izd., isprav. M.: FIZMATLIT, 2005. 320 p.
12. *Sinel'nikov B.M.* Laktoza I ee proizvodnye. Spb.: Professiya, 2007. 768 p.
13. *Fetisov E.A.* Statisticheskie metody kontrolya kachestva molochnoy produktsii: spravochnoe rukovodstvo / M.: Agropromizdat, 1985. 80 p.
14. *Fialkova E.A., Evdokimov I.A., Kulenko V.G., Kachalova E.A., Kostyukov E.M.* Teoriya rosta kristallov laktozy v zavisimosti ot ih razmerov / Sb. materialov mezhdunarodnogo nauchno-tehnicheskogo seminaru «Sovremennyye napravleniya pererabotki syvorotki», Stavropol: NOU «Obrazovatel'nyy nauchno-tehnicheskyy tentr molochnoy promyshlennosti», 2006. P. 57-58.
15. <http://www.statsoft.ru>: «Planirovanie eksperimenta».

**Бредихин Сергей Алексеевич** – д.т.н., проф., зав. кафедрой процессов и аппаратов перерабатывающих производств РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, 127550, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49; тел.: (499) 977-92-73; e-mail: [Bredihin2006@yandex.ru](mailto:Bredihin2006@yandex.ru)

**Бредихин Алексей Сергеевич** – нач. отдела ООО «КЛЭКС», 119034, г. Москва, Зубовский бульвар, д. 4, стр. 1; тел.: 8 (499) 703-48-07; e-mail: [Abredikhin@clickexpress.ru](mailto:Abredikhin@clickexpress.ru)

**Червецов Виктор Владимирович** – д.т.н., зав. лабораторией ГНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт молочной промышленности», 115093, г. Москва, ул. Люсиновская, д. 35, корп. 7; e-mail: [gnu-vnimi@yandex.ru](mailto:gnu-vnimi@yandex.ru)

**Bredikhin Sergey Alekseevich** – Dr. Sci. Tech., Professor, Head of the Department «Processes and offices of processing industries» Russian state agrarian university named after K.A. Timiryazev (127550, Moscow, Timiryazevskaya St., 49, ph.: (499) 977-92-73; e-mail: [Bredihin2006@yandex.ru](mailto:Bredihin2006@yandex.ru)).

**Bredikhin Alexey Sergeevich** – Head of the Department of JSC KLEKS, (119034, Moscow, Zubovsky Boulevard of 4, of p. 1; ph.: (499) 703-48-07; e-mail: [Abredikhin@clickexpress.ru](mailto:Abredikhin@clickexpress.ru)).

**Chervetsov Victor Vladimirovich** – Dr. Sci. Tech. Head of the laboratory of the Public scientific institution All-Russian research institute of the dairy industry, 115093, Moscow, Lyusinovskaya St., of 35, building 7; e-mail: [gnu-vnimi@yandex.ru](mailto:gnu-vnimi@yandex.ru).