

На правах рукописи



**Славоросова Елена Викторовна**

**РАЗРАБОТКА КРИСТАЛЛИЗАТОРА-ВЫПАРИВАТЕЛЯ  
ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ НФ-КОНЦЕНТРАТА МОЛОЧНОЙ  
СЫВОРОТКИ**

Специальность: 05.18.12. – Процессы и аппараты пищевых производств

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2021

Работа выполнена на кафедре технологического оборудования федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Вологодская государственная молочнохозяйственная академия имени Н.В. Верещагина»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
**Фиалкова Евгения Александровна**

Официальные оппоненты: **Евдокимов Иван Алексеевич**  
доктор технических наук, профессор,  
ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет», заведующий базовой кафедрой  
«Технология молока и молочных продуктов»

**Петров Сергей Михайлович**  
доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВО «Московский государственный университет технологий и управления им. К. Г. Разумовского (ПКУ)»,  
профессор кафедры «Системы автоматизированного управления»

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Воронежский государственный университет инженерных технологий"

Защита диссертации состоится 18 ноября 2021 г. в 13:30 на заседании диссертационного совета Д 212.196.07 на базе ФГБОУ ВО «РЭУ им. Г.В. Плеханова» по адресу: 117997, г. Москва, Стремянный пер., д. 36., корп.3, ауд. 353.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в Научно-информационном библиотечном центре им. академика Л.И. Абалкина ФГБОУ ВО «РЭУ им. Г.В. Плеханова» по адресу 117997, г. Москва, ул. Зацепа, д. 43 и на сайте организации <http://ords.rea.ru/>

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
доктор химических наук,  
профессор

Чалых Татьяна Ивановна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** В соответствии с проектом стратегии развития пищевой и перерабатывающей промышленности Российской Федерации до 2030 года перед молочной промышленностью стоят задачи снижения энергопотребления; обеспечения улучшения экологической обстановки в промышленных зонах; вовлечения в хозяйственный оборот вторичных ресурсов, получаемых при производстве молочных продуктов; расширения ассортимента выпускаемой продукции за счет внедрения современных технологий, повышающих пищевую и биологическую ценность продуктов.

Представленная на защиту работа посвящена переработке и вовлечению в производство основного вторичного ресурса молочной промышленности – сыворотки. При переработке менее 20 т молока в смену для производства сыра и творога сыворотку, полученную при основном производстве и обладающую высокой пищевой ценностью и лечебными свойствами, как правило, не используют в пищевых целях, в то же время слив сыворотки в канализацию наносит огромный ущерб экологии, т.к. показатель биохимического потребления кислорода (БПК) молочной сывороткой составляет 50–60 г O<sub>2</sub>/л, что почти в 200 раз больше, чем для хозяйственно-бытовых сточных вод.

Основным недостатком сыворотки, препятствующим её широкому применению для пищевых целей, является избыток влаги (94 % – 95 %). При этом в сухом веществе сыворотки наблюдается избыток лактозы (70 %) и минеральных веществ (15 %). Известное оборудование, используемое для переработки сыворотки, рассчитано на большую производительность, и его применение при малых объемах сыворотки экономически нецелесообразно. Разработка оборудования для переработки сыворотки при её объемах менее 20 т в сутки является актуальной задачей.

Большой вклад в научное развитие переработки молочной сыворотки внесли работы Храмцова А.Г., Липатова Н.Н., Евдокимова И.А., Остроумова Л.А., Гаврилова Г.Б., Нестеренко П.Г., Василичина С.В., Жидкова В.Е., Рябцевой С.А., Крашенинина П.Ф., Кравченко Э.Ф., Коваленко М.С., Залашко М.В., Павлова В.А., Полянского К.К., Дыкало Н.Я., Бачуриной Т.П., Володина Д.Н. и др.

**Цель работы и задачи исследований.** Целью диссертационной работы является разработка кристаллизатора-выпаривателя для переработки НФ-концентрата молочной сыворотки, позволяющего усовершенствовать процесс производства частично делактозированной деминерализованной молочной сыворотки.

В соответствии с поставленной целью сформулированы следующие задачи:

- проанализировать возможность использования известного барботажного кристаллизатора с воздушным охлаждением и подогревом для совмещения процесса сгущения НФ-концентрата молочной сыворотки и кристаллизации лактозы;
- разработать конструкцию кристаллизатора, позволяющую совместить процессы кристаллизации и выпаривания НФ-концентрата молочной

сыворотки на основе анализа гидродинамических и термодинамических процессов;

- провести экспериментальные исследования для обоснования наиболее эффективных режимов работы кристаллизатора с воздушным и водяным охлаждением и подогревом;

- разработать методику инженерного расчета, рассчитать и изготовить кристаллизатор-выпариватель;

- разработать математическую модель процессов теплообмена, выпаривания и кристаллизации лактозы в кристаллизаторе с воздушным и водяным охлаждением и подогревом с циклическими температурными режимами работы;

- на основе кристаллизатора-выпаривателя создать пилотную установку для выпаривания НФ-концентрата молочной сыворотки и кристаллизации лактозы и провести её испытания;

- разработать линию производства частично делактозированной деминерализованной сыворотки и её аппаратное оформление;

- разработать методику оптимизации аминокислотного состава и оптимизировать состав композитного продукта на основе частично делактозированной деминерализованной сыворотки;

- оценить энергетическую эффективность усовершенствованного процесса производства лактозы и частично делактозированной деминерализованной сыворотки.

**Рабочая гипотеза.** Была выдвинута гипотеза, заключающаяся в возможности совмещения процессов концентрирования сыворотки и кристаллизации лактозы, при организации в кристаллизаторе циклических температурных режимов, что позволит использовать в качестве исходного сырья НФ-концентрат молочной сыворотки.

**Научная новизна работы:**

- проведено теоретическое обоснование возможности использования кристаллизатора с воздушным и водяным охлаждением и подогревом для выпаривания НФ-концентрата молочной сыворотки, совмещенного с кристаллизацией лактозы;

- теоретически исследовано влияние продолжительности циклов нагревания и охлаждения, а также расхода воздуха в процессе кристаллизации, совмещенном с выпариванием, на изменение содержания сухих веществ в межкристальной жидкости и на температурные режимы;

- экспериментально исследовано влияние термодинамических параметров работы кристаллизатора и физико-химических свойств кристаллизата на степень кристаллизации и средний размер кристалла лактозы;

- разработана математическая модель процесса кристаллизации, зависящая от физико-химических свойств кристаллизата (температуры, вязкости, плотности, содержания сухих веществ, растворимости лактозы, пересыщения, теплоты парообразования), расхода воздуха и его термодинамических свойств (температуры, влагосодержания), от термодинамических свойств теплоносителя подаваемого в рубашку.

### **Практическая значимость работы:**

- предложена новая установка для переработки НФ-концентрата молочной сыворотки, совмещающая в себе процессы выпаривания и кристаллизации лактозы, которая может быть использована на предприятиях, имеющих 10-50т молочной сыворотки в сутки;
- разработана методика инженерного расчета новой конструкции установки для кристаллизации лактозы;
- разработана энергоэффективная линия производства частично делактозированной деминерализованной сыворотки и предложено ее аппаратное оформление;
- научные и практические результаты исследований использованы при разработке конструкторской документации на устройство для кристаллизации лактозы с воздушным и водяным охлаждением и подогревом КР.0005;
- опытная модель кристаллизатора-выпаривателя КР.0005 на основе производственных испытаний, проведенных АО «УОМЗ» ВГМХА им. Н.В. Верещагина, рекомендована к внедрению;
- результаты проведенных исследований и научно-инженерных расчетов используются в учебном процессе по направлениям подготовки 15.03.02 Технологические машины и оборудование, 19.03.03 Продукты питания животного происхождения.

### **Научные положения, выносимые на защиту:**

- закономерности процесса сгущения НФ-концентрата молочной сыворотки при использовании для нагревания воздушного и водяного теплоносителей;
- закономерности процесса кристаллизации лактозы с циклическими температурными режимами при воздушном и водяном охлаждении и нагревании кристаллизата;
- методика инженерного расчета кристаллизатора-выпаривателя с воздушным и водяным охлаждением и подогревом;
- научно-техническое решение процесса кристаллизации, совмещенного с выпариванием, и его аппаратное оформление;
- математическая модель процесса циклической кристаллизации лактозы;
- научно-техническое решение процесса производства частично делактозированной деминерализованной сыворотки и его аппаратное оформление;
- методика расчета оптимального аминокислотного состава композитного продукта;
- результаты разработки состава пищевого продукта, созданного на основе частично делактозированной деминерализованной молочной сыворотки;
- результаты оценки энергетической эффективности процесса производства частично делактозированной деминерализованной молочной сыворотки.

**Область диссертационного исследования** соответствует пунктам 3.2, 3.3, 3.4, 4 паспорта специальности 05.18.12 - Процессы и аппараты пищевых производств.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы доложены и обсуждены на конференциях международного и всероссийского

уровней: научно-практические конференции «Вологодские молочные продукты – основа здорового питания» ВГМХА им. Н.В. Верещагина, (2014-2016 г.); 4-я международная практическая конференция «Научные и практические аспекты совершенствования качества продуктов детского и геродиетического питания», Истра, (2014 г.); международная научно-практическая конференция молодых ученых «Инновационные тенденции развития Российской науки» ФГОУ ВПО КрасГАУ, (2015 г.); III ежегодная международная научно-практическая конференция «Биотехнология: наука и практика» ФГБОУ ВПО Воронежский государственный университет инженерных технологий (2015); международная научно-практической конференции: «Приоритетные направления развития регионального экспорта продукции АПК» ФГБОУ ВО Красноярский ГАУ, Красноярск, (2019 г.); международная научно-практическая конференция «Биотехнологические основы получения и применения природных биологически активных веществ» (Нарочанские чтения - 12) Белорусский государственный университет, Северо-Кавказский федеральный университет, Минск – Ставрополь (2020 г.); всероссийская научно-практическая конференция «Безопасность и качество сельскохозяйственного сырья и продовольствия», Москва (2020 г.).

**Публикации.** По результатам исследований опубликовано 19 печатных работ, из них 7 в изданиях, входящих в перечень российских рецензируемых научных журналов. Получены 2 патента Российской Федерации.

**Достоверность полученных результатов** работы подтверждена соответствием результатов теоретических и экспериментальных исследований, 3-5 кратной повторностью экспериментов, использованием современных приборов и стандартных методик.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация включает введение, 6 глав, заключение, список использованной литературы из 160 наименований и приложения. Работа изложена на 163 страницах основного текста, включает 54 рисунка и 19 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**В главе 1 «Современное состояние вопроса и задачи исследования»** установлено, что наиболее целесообразным способом переработки молочной сыворотки является производство из неё лактозы и частично делактозированной деминерализованной сыворотки, которая является сбалансированным по минеральному, белковому и углеводному составу продуктом, который может быть использован в пищевых целях как самостоятельный или в смеси с другими продуктами, повышая их пищевую ценность.

Известные способы производства лактозы и частично делактозированной деминерализованной молочной сыворотки, экономически нецелесообразны для предприятий с малыми объемами сыворотки, т. к. включают высокопроизводительное и энергоемкое вакуум-выпаривание и энергоемкий электродиализ. Одним из путей решения этой проблемы может быть применение перспективного и энергоэффективного метода – нанофильтрации, совмещенной с диафильтрацией, которая обеспечивает одновременное

концентрирование, деминерализацию и раскисление пищевых растворов. Степень деминерализации сыворотки при использовании диафильтрации может достигать 55 %. Раскисление повышается с 10 до 30 %. Массовая доля сухих веществ может достигать 28 %. Энергозатраты при концентрировании молочной сыворотки с помощью нанофильтрации до умеренных концентраций на порядок ниже, чем при вакуум-выпаривании. Но концентрация сыворотки при нанофильтрации недостаточна для проведения процесса кристаллизации лактозы.

Можно заключить следующее: разработка устройства для осуществления дальнейшего сгущения НФ-концентрата и кристаллизации лактозы позволит получить кристаллизат, из которого лактозу можно удалить механическим путем, получив в результате частично делактозированную деминерализованную сыворотку, что позволит решить проблему использования отходов производства сыра и творога на пищевые цели. Такая сыворотка может быть использована в качестве компонента в продуктах детского питания или в получении продуктов высокой биологической ценности при смешивании с отрубями.

Структурная схема организации исследований представлена на рисунке 1.

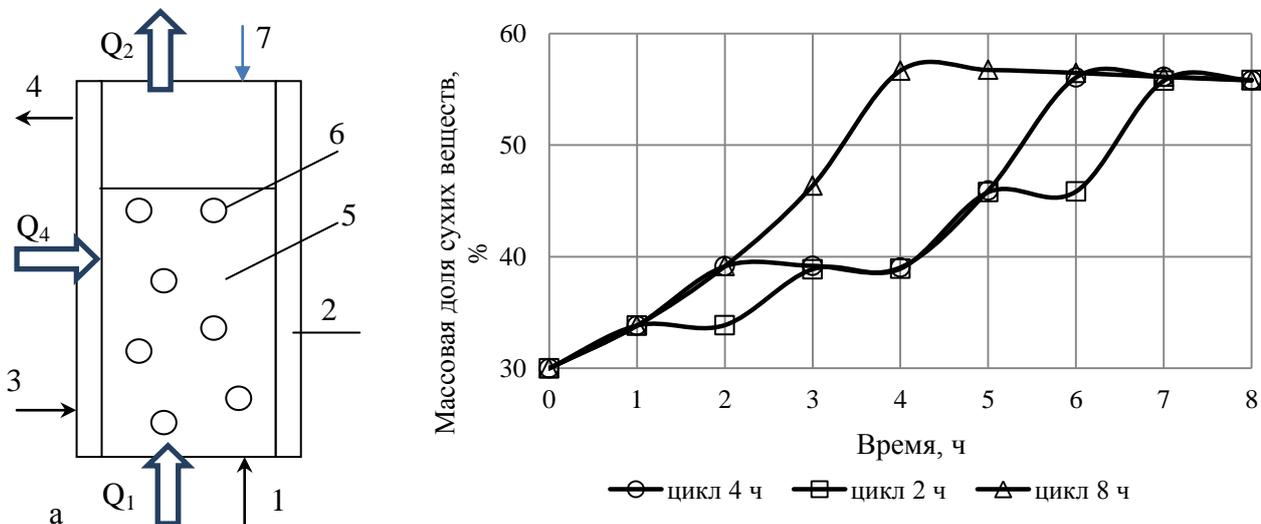


Рисунок 1 – Структурная схема организации исследований

**В главе 2 «Сравнительный анализ и обоснование режимов работы кристаллизатора с воздушным и водяным теплоносителями»** исследованы температурные режимы работы кристаллизатора с единственным воздушным теплоносителем. В процессе нагрева кристаллизата горячим воздухом с

температурой 60 °С и расходом 0,003 м<sup>3</sup>/с максимальная температура, достигаемая кристаллизатором, составляет примерно 31,4 °С. При этой температуре наступает равновесие, при котором подводимое к кристаллизатору количество теплоты будет равно количеству теплоты, теряемому с выпаренной влагой. При такой температуре интенсивность выпаривания слабая. За 24-часовой период циклического нагревания и охлаждения сухие вещества увеличиваются с 30 % до 38,5 %, что не позволяет выкристаллизовать лактозу так, чтобы в последующем имелась возможность отделить ее от кристаллизата.

Одним из путей интенсификации процессов выпаривания и кристаллизации является повышение температуры выпаривания и снижение температуры кристаллизации. Для этого в кристаллизаторе были предусмотрены два теплоносителя – воздушный, подаваемый непосредственно в кристаллизатор, и водяной, подаваемый в рубашку (рисунок 2).



1 – воздухопровод подачи воздуха в кристаллизатор, 2 – водяная рубашка, 3 и 4 – система подвода и отвода воды, 5 – кристаллизатор, 6 – воздушные пузырьки;  $Q_1$  и  $Q_4$  – количество теплоты, которое получает кристаллизатор от воздуха и воды;  $Q_2$  – количество тепла, уносимое воздухом, 7 – подпитка кристаллизатора НФ-концентратом

Рисунок 2 – а) Схема колонки кристаллизатора с воздушным и водяным теплоносителями; б) изменение содержания сухих веществ кристаллизата в процессе выпаривания и кристаллизации

Кроме того, интенсификация процесса кристаллизации обеспечивается чередованием процессов охлаждения и нагревания кристаллизата, т.к. периодическое нагревание обеспечивает растворение мелких кристаллов, которые не поддаются механическому отделению, и интенсивный рост крупных кристаллов за счет повышения степени пересыщения кристаллизата. В процессе нагревания кристаллизата происходит его выпаривание, а в процессе охлаждения – кристаллизация лактозы. Каждый цикл работы кристаллизатора включает по одному нагреванию и охлаждению. На рисунке 2б представлен график изменения сухих веществ кристаллизата при двух-, четырех- и восьмичасовом циклах работы кристаллизатора-выпаривателя. На рисунке 2а представлена схема колонки кристаллизатора с подводом и отводом тепла.

Тепловой баланс колонки без учета тепла, поступающего с НФ-концентратом (как малой величиной) имеет вид:

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

В колонке кристаллизат получает тепло  $Q_3$  с поступающими в него воздухом  $Q_1$  и с водой  $Q_4$ , циркулирующей в рубашке и теряет тепло с выходящим воздухом  $Q_2$ . Разбивая весь процесс на малые интервалы времени  $\Delta\tau$ , в течение которых физические параметры кристаллизата изменяются по линейной зависимости, получим температуру кристаллизата на конец этого промежутка  $t_k, ^\circ\text{C}$

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

где  $c_g$  – удельная теплоемкость воздуха, Дж/(кг·К);  $t_{в.н}$  – температура воздуха на входе в колонку,  $^\circ\text{C}$ ;  $t_{в.к}$  – температура воздуха на выходе из колонки (равна температуре кристаллизата на конец промежутка времени  $\Delta\tau$ ),  $^\circ\text{C}$ ;  $d_{в.н}$ ,  $d_{в.к}$  – влагосодержание воздуха на входе в колонку и выходе из нее, кг/кг;  $r$  – удельная теплота парообразования, Дж/кг;  $\rho_g$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $V_1$  – объемный расход воздуха, м<sup>3</sup>/с;  $K_1$  – коэффициент теплопередачи между кристаллизатом и горячей водой, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $f_1$  – площадь поверхности теплопередачи, м<sup>2</sup>;  $t_T$  – температура теплоносителя,  $^\circ\text{C}$ ;  $c_{кр}$  – удельная теплоемкость кристаллизата, Дж/(кг·К);  $m_{кр}$  – масса кристаллизата, кг;  $t_n$  – температура кристаллизата на начало промежутка времени  $\Delta\tau$ ,  $^\circ\text{C}$ .

Из уравнения материального баланса (влага поступает с воздухом и подпитывающим НФ-концентратом и теряется с выходящим из кристаллизатора воздухом, а сухие вещества поступают с концентратом) процентное содержание сухих веществ в кристаллизате на конец промежутка времени  $\Delta\tau$  составляет

$$b_k = \frac{\frac{b \cdot m_{кр}}{100} + 0,3 \frac{(d_{в.к} - d_{в.н}) \cdot \rho_{ж} \cdot V_1 \cdot \Delta\tau}{\rho_{ж}} \cdot \rho_n}{m_{кр} + \frac{(d_{в.к} - d_{в.н}) \cdot \rho_{ж} \cdot V_1 \cdot \Delta\tau}{\rho_{ж}} \cdot \rho_n - (d_{в.к} - d_{в.н}) \cdot \rho_{ж} \cdot V_1 \cdot \Delta\tau} 100\%, \quad (3)$$

Где  $b$  – начальное содержание сухих веществ кристаллизата, %;  $\rho_{ж}$  – плотность воды, кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_n$  – плотность НФ-концентрата.

На основании уравнений теплового и материального баланса установлено, что при температуре горячего и холодного воздуха 60  $^\circ\text{C}$  и 0  $^\circ\text{C}$  соответственно, и температуре горячей и холодной воды 70  $^\circ\text{C}$  и 1  $^\circ\text{C}$  соответственно, максимальная температура, достигаемая кристаллизатом составляет 62  $^\circ\text{C}$ , а минимальная – 1,3  $^\circ\text{C}$ . При 8-часовом периоде работы сухие вещества сыворотки достигают 56 %, причем конечный уровень сухих веществ не зависит от продолжительности цикла (рисунок 2б).

**В главе 3 «Экспериментальные исследования»** процессы выпаривания и кристаллизации изучались на экспериментальной установке. В качестве исходного сырья – концентрат творожной сыворотки, полученный с помощью нанофильтрации совмещенной с диафильтрацией, с массовой долей сухих веществ – 27,2 %, степенью деминерализации – 47 % и раскисления – 30 %.

Установлено, что наиболее эффективный режим работы кристаллизатора достигается при первоначальном сгущении исходного НФ-концентрата до содержания сухих веществ около 50 % путем барботирования воздуха с

температурой 45 °С в кристаллизат при одновременном его нагревании с помощью горячей воды с температурой 70 °С – 72 °С, подаваемой в рубашку (рисунок 2а). В конце каждого часа в течение всего процесса выпаривания осуществлялось взвешивание кристаллизата, измерение сухих веществ в межкристальном растворе и микрофотосъемка кристаллов. Как видно из графика (рисунок 3), за 7 часов выпаривания содержание сухих веществ увеличилось от 27,2 % до 50,5 %, а при дальнейшем выпаривании стало падать, т.к. начиналась интенсивная кристаллизация, что хорошо просматривается при микроскопировании (рисунок 4).

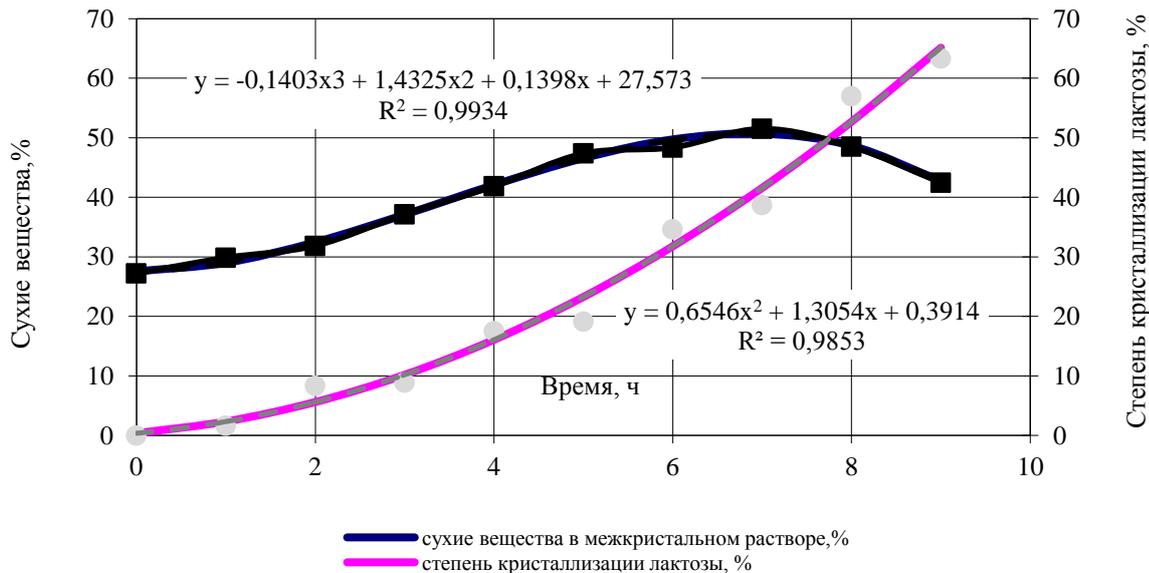
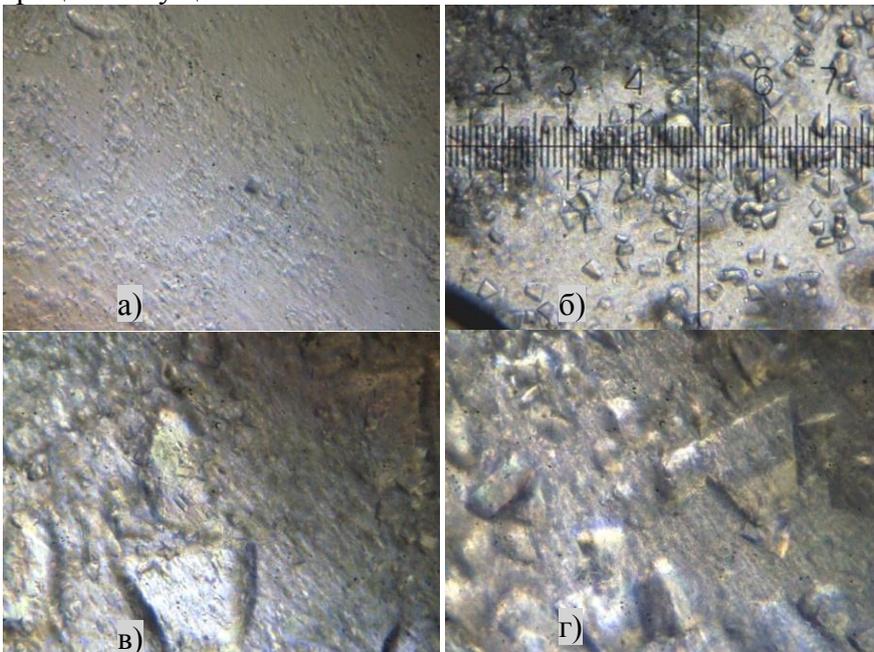


Рисунок 3– Изменение содержания сухих веществ и степени кристаллизации лактозы в процессе сгущения

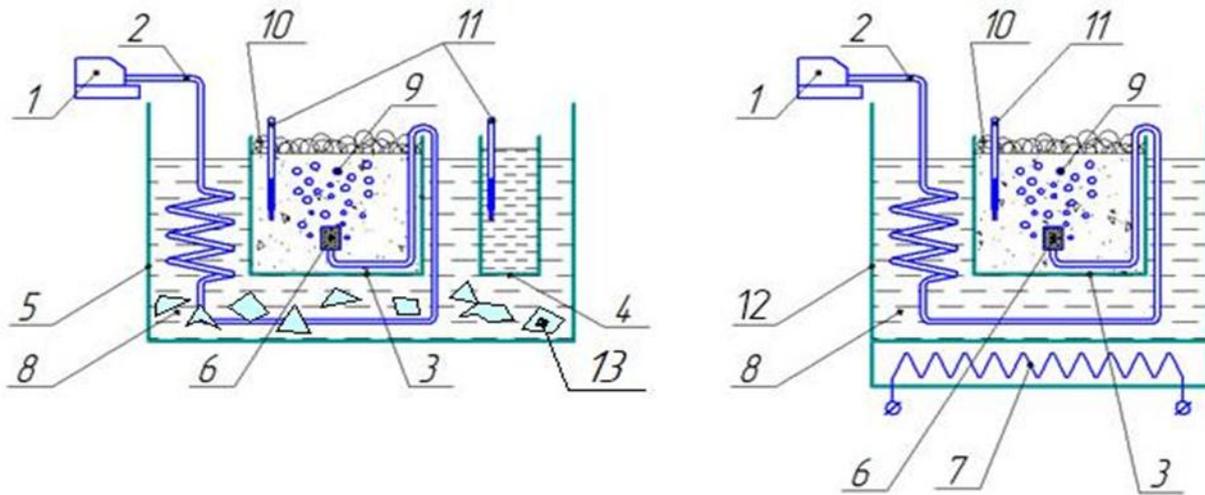


а) через 5 часов, б) через 6 часов, в) через 7 часов, г) через 8 ч  
Рисунок 4 – Микрофотографии кристаллов в процессе выпаривания при 20-ти кратном увеличении (1 деление линейки=3,2мкм)

Для проведения эксперимента использовался НФ-концентрат творожной сыворотки, обессоленный до 50%, сгущенный до содержания сухих веществ 55%.

Степень кристаллизации при этом достигала 57 %. Дальнейшее сгущение представлялось нецелесообразным, поэтому после 8-часового сгущения производилось охлаждение. В течение часа охлаждения, за счет интенсивной кристаллизации, сухие вещества понижались до 42,5 %, а степень

кристаллизации лактозы повышалась до 63,3 %. Экспериментальные исследования влияния циклических температурных режимов на процесс кристаллизации лактозы проводились на лабораторном образце кристаллизатора-выпаривателя (рисунок 5).

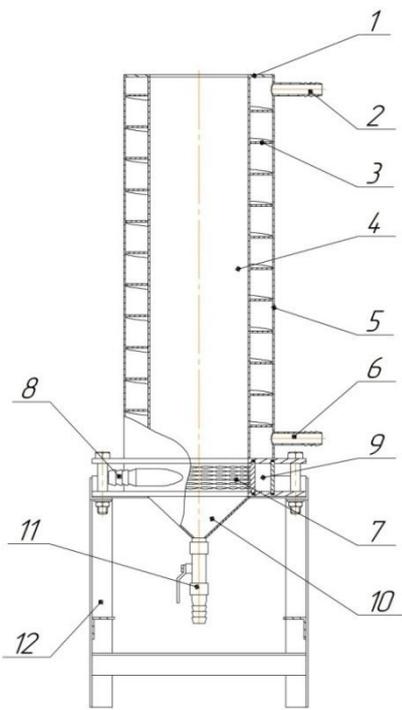


1 – воздушный компрессор; 2 – воздуховод; 3 – емкость с экспериментальным образцом; 4 – емкость с контрольным образцом; 5 – холодный термостат; 6 – устройство для барботирования воздуха; 7 – нагревательный элемент; 8 – вода; 9 – пузырьки воздуха; 10 – пена; 11 – термометры; 12 – горячий термостат; 13 – лед

Рисунок 5 – Схема экспериментальной установки: а) с охлаждением б) с подогревом

Для осуществления циклического температурного режима экспериментальный образец 3 периодически перемещается из холодного термостата 5 в горячий 12. При этом контрольный образец 4 все время находился в холодном термостате. В горячем термостате сыворотка нагревалась от воды путем теплопередачи через стенку и от барботируемого воздуха, который, проходя по спиралевидному воздуховоду, нагревался от той же горячей воды. В холодном термостате охлаждение сыворотки осуществлялось подобным образом при помощи холодных воздуха и воды. Расход воздуха составлял  $15 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ . Сухие вещества концентрата молочной сыворотки состояли в основном из лактозы (68 %) и белка (13,2 %), а также молочной кислоты (11,3 %), золы (6,6 %) и жира (0,9 %). В горячем термостате температура поддерживалась на уровне  $70 \text{ }^\circ\text{C}$ , а в холодном на уровне  $5 \text{ }^\circ\text{C}$ . Наибольшую эффективность показал режим кристаллизации с 4-мя циклами охлаждения, при этом степень кристаллизации составила 65 %. Такой режим позволяет увеличить средний размер кристалла почти в 2 раза по сравнению с контрольным образцом, режим охлаждения которого соответствует традиционному.

**В главе 4 «Разработка конструкции кристаллизатора-выпаривателя с воздушным и водяным охлаждением и подогревом»** представлена методика инженерного расчета и рассчитаны конструктивные параметры кристаллизатора-выпаривателя вместимостью 5 л: высота корпуса  $H_{кр}=0,6 \text{ м}$ , внутренний диаметр колонки  $D_{вн}=0,14 \text{ м}$ , количество отверстий в барботере  $n=102$  диаметром  $d_0=0,003 \text{ м}$  (рисунок 6).



1 – верхняя крышка; 2 – штуцер для отвода воды; 3 – направляющая рубашки; 4 – колонка; 5 – рубашка колонки; 6 – штуцер для подачи воды; 7 – отверстия в барботере; 8 – патрубок подачи воздуха; 9 – барботер; 10 – днище; 11 – штуцер для удаления готовых кристаллов; 12 – опора  
Рисунок 6 – Схема кристаллизатора с циклическими температурными режимами работы

Аппарат представляет собой колонку 4, внутри которой расположен барботер 9 с отверстиями 7. Горячий и холодный воздух подается через патрубок 8. В рубашку 5 колонки через штуцера 6 и 2 подается и отводится горячая или холодная вода, которая распределяется в рубашке с помощью спиралевидной направляющей 3. Кристаллизатор установлен на опору 12.

Определены термо- и гидродинамические параметры процесса теплопередачи между кристаллизатором и водным теплоносителем. Скорость движения водного теплоносителя в винтовом канале рубашки – 0,3 м/с, коэффициент теплопередачи между кристаллизатором и водным теплоносителем при нагревании кристаллизата горячей водой составляет 323 Вт/(м<sup>2</sup>·К), при охлаждении кристаллизата холодной водой, составляет 238,6 Вт/(м<sup>2</sup>·К). Рассчитаны термо- и гидродинамические параметры процесса теплопередачи между кристаллизатором и воздушным пузырьком. Скорость подъема воздушного пузырька – 0,24 м/с, коэффициент теплопередачи между воздушным пузырьком и кристаллизатором для процесса нагревания – 5,3 Вт/(м<sup>2</sup>·К), процесса охлаждения – 7,3 Вт/(м<sup>2</sup>·К).

**В главе 5 «Испытания пилотной установки для выпаривания НФ-концентрата молочной сыворотки и кристаллизации лактозы»** для оптимизации режимов работы кристаллизатора-выпаривателя была разработана математическая модель процессов теплопередачи, выпаривания и кристаллизации при циклических температурных режимах, зависящая от физико-химических свойств кристаллизата (температуры, вязкости, плотности, содержания сухих веществ, растворимости лактозы, пересыщения, теплоты парообразования), расхода воздуха и его термодинамических свойств (температуры, влагосодержания). Перечисленные параметры системы взаимосвязаны и в процессе выпаривания и кристаллизации изменяются. Для анализа изменения вышеперечисленных параметров каждый цикл охлаждения и нагревания разбивался на малые интервалы времени  $\Delta t$ , в течение которых физические параметры кристаллизата можно условно принять изменяющимися по линейной зависимости. Описание тепло- и массообменных процессов проводилось на основании теплового и материального балансов (2) и (3).

Основные закономерности процесса кристаллизации лактозы представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Основные закономерности процесса кристаллизации лактозы

| Параметр   | Формула  | Параметр                           | Формула   |
|--|--|------------------------------------|---|
| Показатель скорости образования кристаллической лактозы  | $\vartheta = \frac{\Delta C}{\Delta \tau \cdot \Delta C_{\text{п}}}$ | Концентрация исследуемого раствора | $C = \frac{m_{\text{л}}}{m_{\text{в}}} \cdot 100\%$   |
| Пересыщение  | $\Delta C_{\text{п}} = C - C_{\text{нас}}$                           | Содержание сухих веществ в мелассе | $C. \text{В.} = \frac{(m_{\text{р.л.}} + m_{\text{б}} + m_{\text{з}}) \cdot 100\%}{m_{\text{р.л.}} + m_{\text{б}} + m_{\text{з}} + m_{\text{в}}}$ |
| Эмпирические зависимости   |  |                                    |   |
| Концентрация насыщенного раствора  | $C_{\text{нас}} = 11,5 \cdot 10^{0,012 \cdot t_{\text{кр}}}$         | Показатель скорости кристаллизации | $\vartheta = 0,032 \cdot 10^{0,045 \cdot t_{\text{кр}}}$  |
| $\Delta C$ – снижение концентрации раствора, кг лактозы на 100 кг влаги, в процентах; $\Delta C_{\text{п}}$ – пересыщение, кг лактозы на 100 кг влаги в процентах; $\Delta \tau$ - расчетный интервал времени, ч; $m_{\text{л}}$ – масса лактозы, кг; $m_{\text{в}}$ – масса влаги, кг; $C$ – концентрация исследуемого раствора, кг лактозы на 100 кг влаги, в процентах; $C_{\text{нас}}$ – концентрация насыщенного раствора, кг лактозы на 100 кг влаги, в процентах; $m_{\text{р.л.}}$ – масса растворенной лактозы, кг; $m_{\text{б}}$ – масса белка, кг; $m_{\text{з}}$ – масса золы, кг. |  |                                    |   |

Предложенная математическая модель позволяет определить количество растворенной и выкристаллизовавшейся лактозы и проанализировать изменение процентного содержания сухих веществ в межкристалльном растворе. Адекватность предлагаемой математической модели оценивалась путем сравнения с данными, полученными на экспериментальной установке.

Для проведения эксперимента использовался НФ-концентрат творожной сыворотки, деминерализованный до 50 %, сгущенный до содержания сухих веществ 55 %. Сухие вещества концентрата сыворотки состояли в основном из лактозы (79,6 %) , белка (13,2 %) и золы (3,7 %). Были исследованы два образца: экспериментальный и контрольный. Начальная температура образцов составляла 68 °С, начальная масса каждого образца – 0,155 кг. Контрольный образец помещался в емкость с холодной водой на 3,5 ч. Температура холодной воды поддерживалась на уровне 3 °С – 5 °С. Экспериментальный образец подвергался циклической температурной обработке. Для этого он помещался в охлаждающую емкость, где охлаждался от начальной температуры 68 °С в течение часа. Охлаждение осуществлялось холодной водой путем теплопередачи и барботированием охлажденного до температуры 10 °С воздуха. Затем образец перемещался в емкость для нагревания на 15 минут. Нагревание осуществлялось горячей водой с температурой 70 °С – 75 °С и подогретым до температуры 40 °С воздухом, который барботировался в кристаллизат. Весь процесс кристаллизации лактозы в опытном образце включал 3-х кратное охлаждение и 2-х кратное нагревание. Расход воздуха составлял  $(16-21) \cdot 10^{-6}$  м<sup>3</sup>/с. Такой большой интервал варьирования расхода воздуха, объясняется тем, что пропускная способность барботера в процессе кристаллизации лактозы снижалась.

Проведен анализ изменения температуры кристаллизата, показателя скорости образования кристаллической лактозы, содержания сухих веществ в межкристалльном растворе, процента выкристаллизованной лактозы.

Результаты проведенных исследований представлены в виде графиков (рисунки 7-10).

В экспериментальном образце происходит одновременное увеличение содержания сухих веществ, связанное с выпариванием влаги и снижение их за счет кристаллизации лактозы. Причем оба эти процесса зависят от температурных режимов. В контрольном образце происходит снижение содержания сухих веществ только за счет кристаллизации лактозы. На рисунке 11 представлены микрофотографии кристаллов лактозы экспериментального и контрольного образцов на конец циклов охлаждения. Если сравнить экспериментальный и контрольный образец, то видно, что кристаллы в экспериментальном образце значительно больше по размеру, что является необходимым условием эффективного отделения лактозы в процессе центрифугирования.

Были проведены испытания пилотной установки (рисунок 12), которая включает в себя кристаллизатор-выпариватель 1, две емкости для холодной 2 и горячей 3 воды и, соответственно, 2 насоса для подачи холодной 5 и горячей 4 воды, и компрессор для подачи воздуха 6.

Исследование процесса сгущения проводилось в течение 9 часов при расходе воздуха  $V=750 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ . Для эксперимента использовалось 6 кг НФ-концентрата творожной сыворотки с массовым содержанием сухих веществ 27,2 %, степенью деминерализации 47 %. Содержание лактозы в сухом веществе –  $(75,3 \pm 0,8) \%$ , белка –  $(13,2 \pm 0,2) \%$ , золы –  $(4,3 \pm 0,2) \%$ , органических кислот –  $(3,7 \pm 0,4) \%$ . Температура барботируемого воздуха составляла 35 °С, температура воды, подаваемой в рубашку кристаллизатора – 63 °С.

В процессе сгущения сухие вещества в кристаллизате возрастали до 50,2 % в течение 8 часов, а в течение последнего часа падали до 49,4 % за счет массовой кристаллизации лактозы. При этом расчетная степень кристаллизации лактозы по отношению к исходным сухим веществам, растворенным в кристаллизате, достигала 38 % (рисунок 13а). Выпаривание до 4-го часа происходило при температуре 56 °С, а к 9-му часу температура падала до 53 °С (рисунок 13б). Это объясняется тем, что вязкость кристаллизата растет и коэффициент теплопередачи от теплоносителя уменьшается.

В результате сгущения исходного нанопольтрата масса кристаллизата составила 2,36 кг с содержанием сухих веществ 49,4 %, масса выпаренной из кристаллизата влаги в процессе сгущения составила 3,64 кг, масса оставшейся в кристаллизате влаги – 1,1 кг, масса выкристаллизованной лактозы составила 0,47 кг.

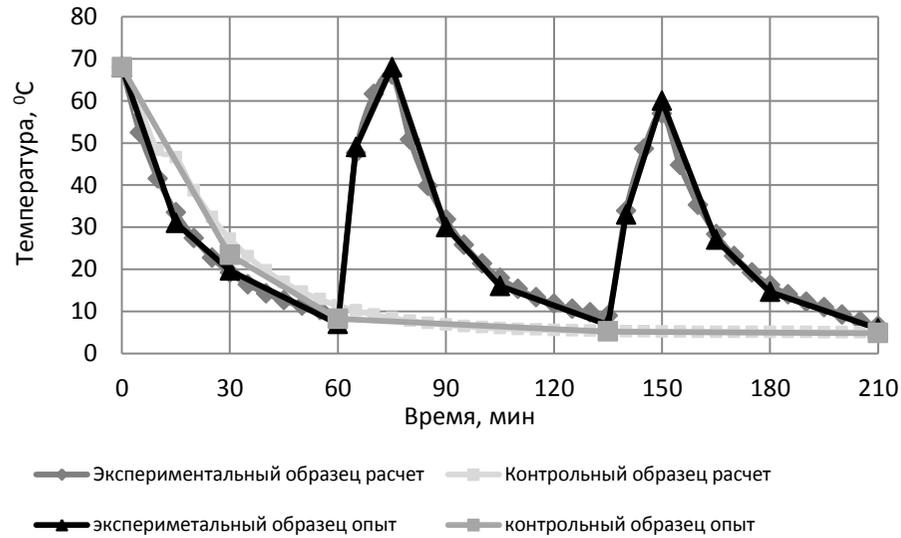


Рисунок 7 – Изменение температуры кристаллизата в экспериментальном и контрольном образцах.

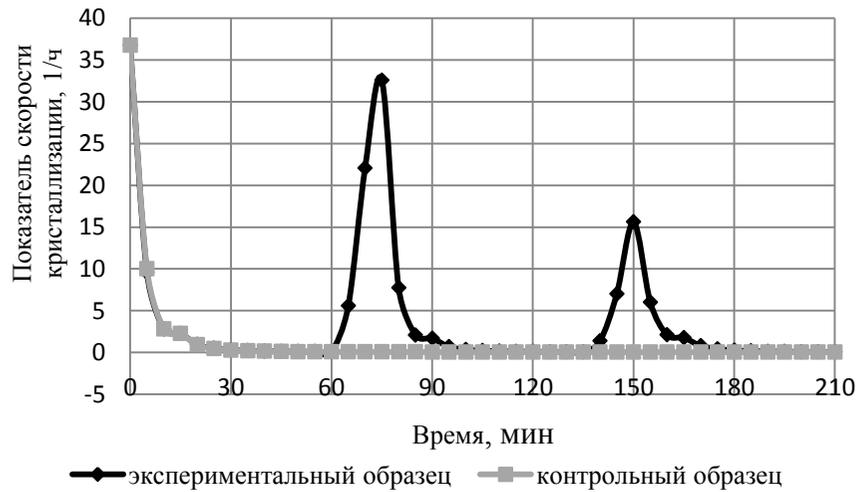


Рисунок 8 – Показатель скорости образования кристаллической лактозы для экспериментального и контрольного образцов

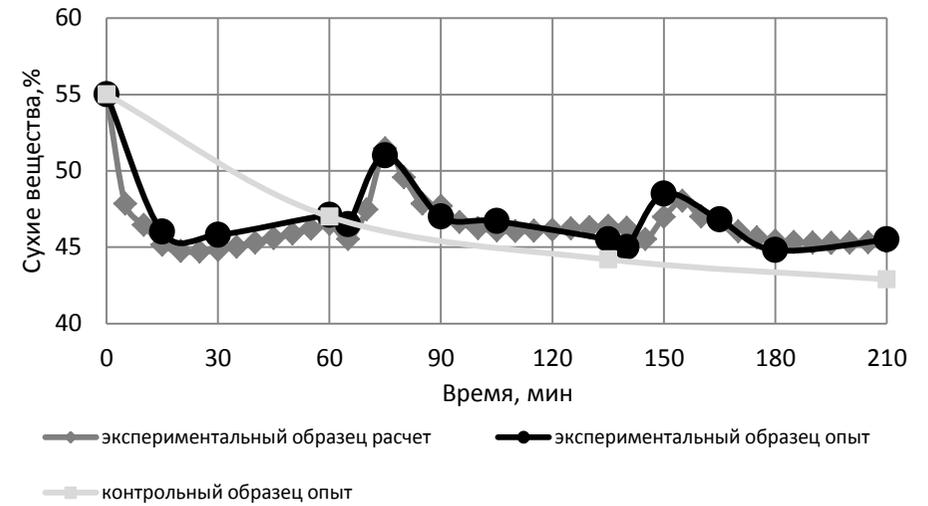


Рисунок 9 – Изменение растворенных сухих веществ в процессе кристаллизации

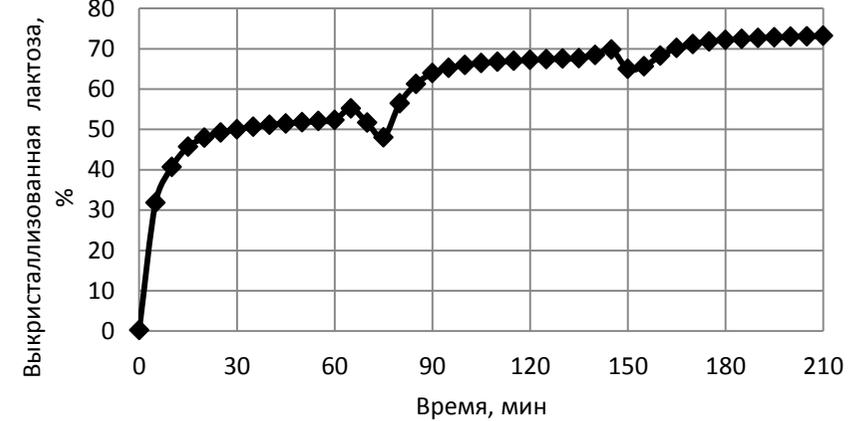
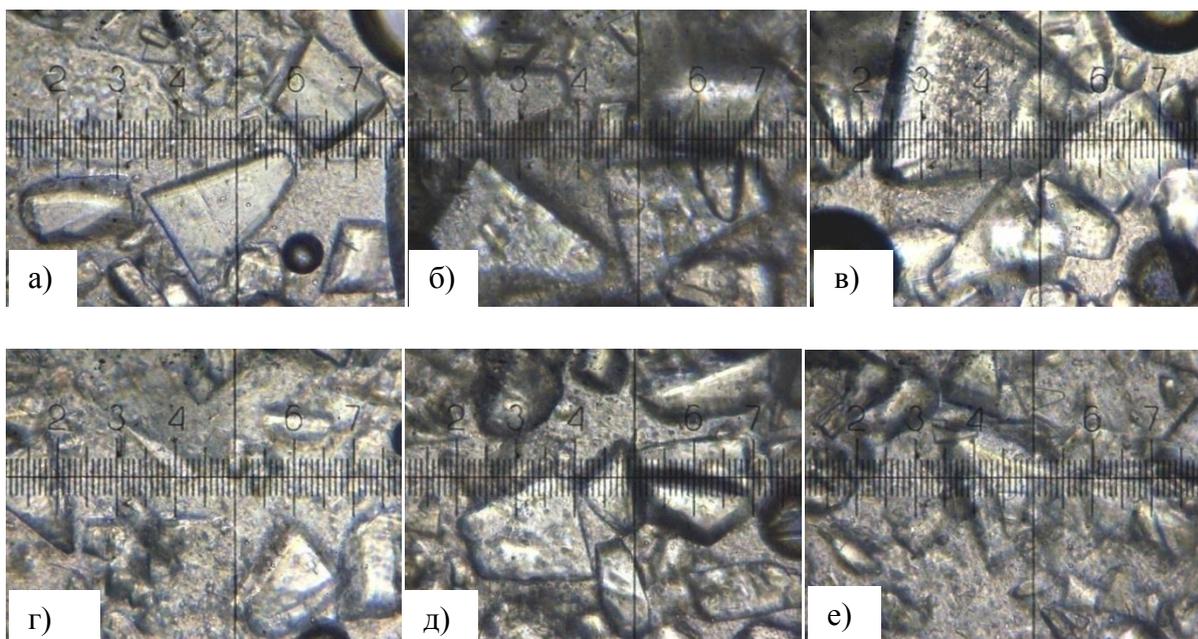
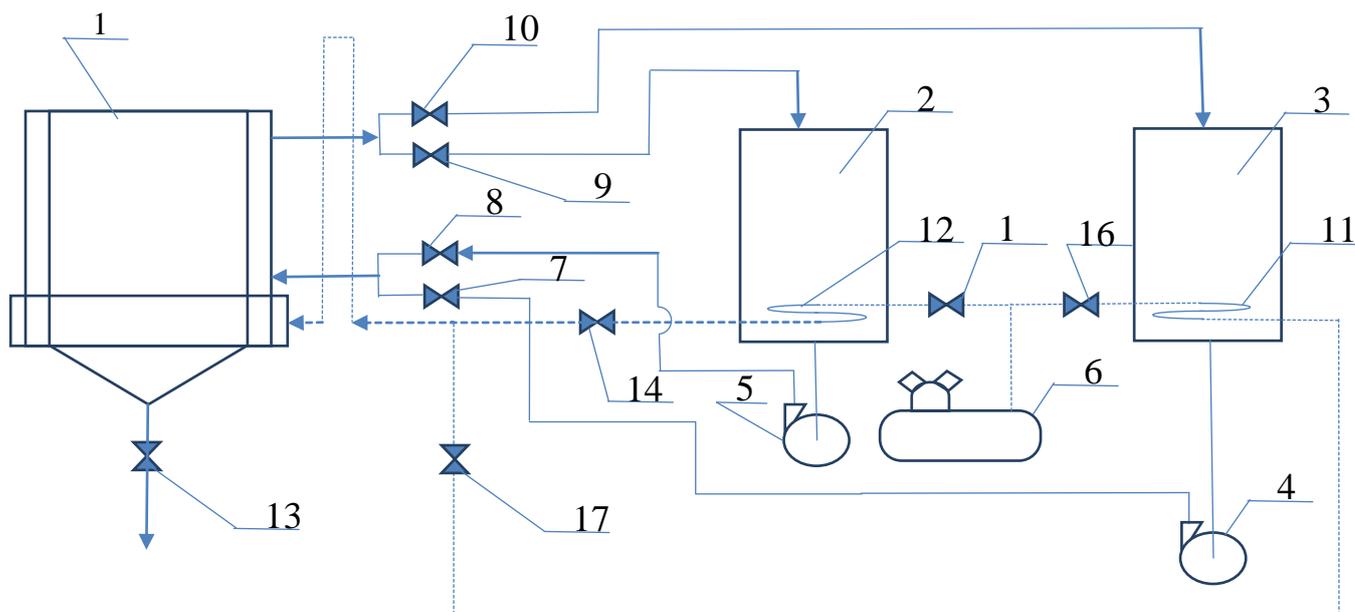


Рисунок 10 – Динамика изменения процента выкристаллизованной лактозы в процессе кристаллизации



Экспериментальный образец: а) через 60 мин, б) через 135 мин, в) через 210 мин;  
 контрольный образец: г) через 60 мин, д) через 135 мин, е) через 210 мин  
 Рисунок 11 – Микрофотографии кристаллов после охлаждения в каждом из 3-х циклов при 20-кратном увеличении (1 деление линейки=6,2мкм)



1 – кристаллизатор-выпариватель; 2 – емкость для холодной воды; 3 – емкость для горячей воды; 4 – насос для подачи горячей воды; 5 – насос для подачи холодной воды; 6 – компрессор для подачи воздуха; 7, 8, 9, 10, 13, 14, 15, 16, 17 – вентили; 11, 12 – змеевик  
 Рисунок 12 – Схема пилотной установки для выпаривания НФ-концентрата молочной сыворотки и кристаллизации лактозы

Эффективный процесс циклической кристаллизации включал: 4 цикла последовательных охлаждений и нагреваний продолжительностью 1 час и 15 минут, соответственно, и последнее охлаждение продолжительностью 3 часа. Температура охлаждающего воздуха – 10 °С, температура холодной воды – 5 °С. Температура греющего воздуха и воды имеют те же значения, что и в процессе сгущения.

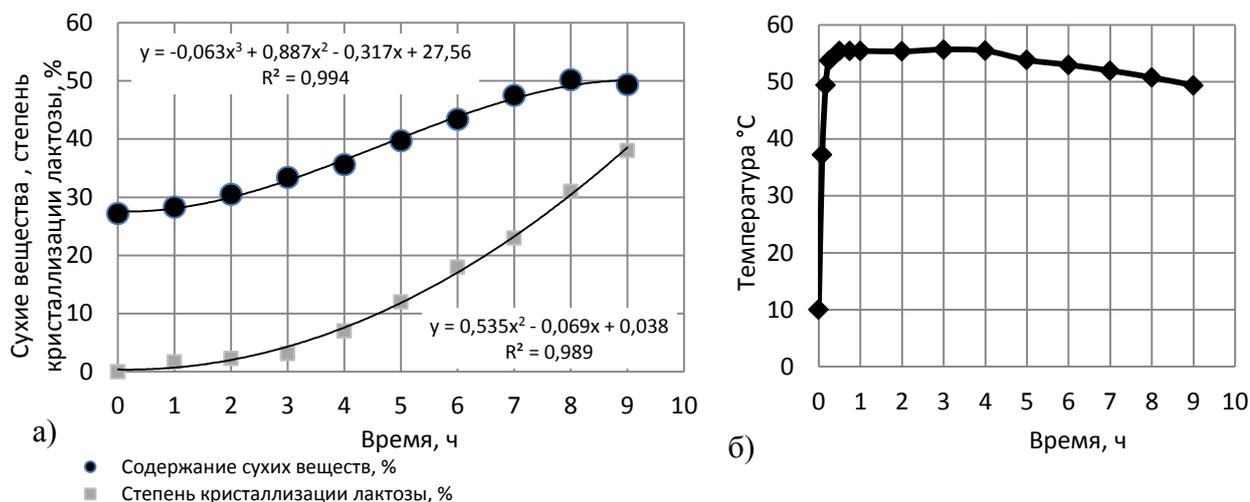


Рисунок 13 – а) Содержание сухих веществ и степень кристаллизации лактозы в процессе сгущения; б) температура в процессе сгущения

В процессе охлаждения температура кристаллизата понижалась до 8 °С. В процессе нагревания его температура росла до 44 °С. В конце процесса циклической кристаллизации содержание сухих веществ уменьшилось с 49,4 % до 32,6 %. Процент выкристаллизованной лактозы по отношению к исходному её количеству увеличился с 51,8 % до 81,4 %. Процент выкристаллизованной лактозы по отношению к исходному содержанию сухих веществ увеличился от 38 % до 60% (рисунок 14).

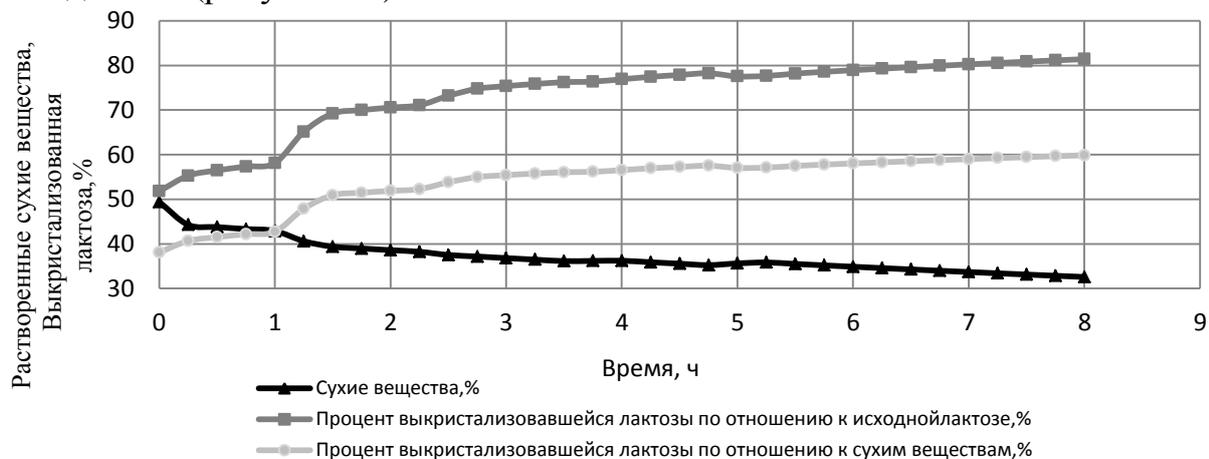
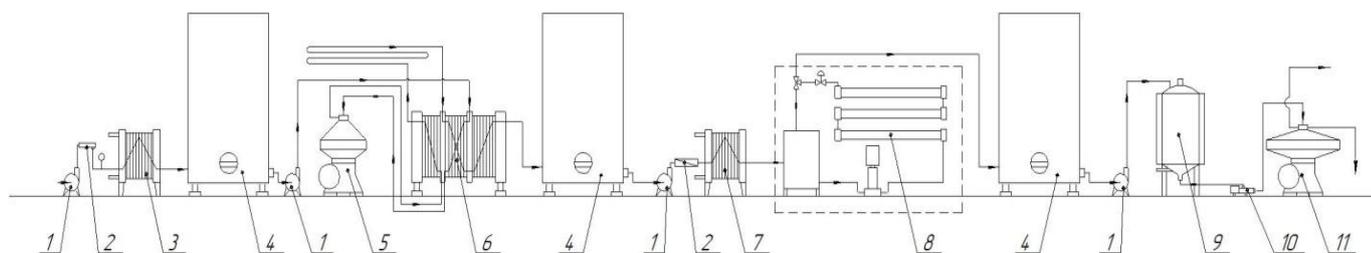


Рисунок 14 – Изменение растворенных сухих веществ, и процента выкристаллизованной лактозы по отношению к исходной лактозе и к исходным сухим веществам

**В главе 6 «Линия производства частично делактозированной деминерализованной молочной сыворотки»** предложен способ производства частично делактозированной деминерализованной молочной сыворотки (рисунок 15), включающий в себя: пастеризацию; осветление сыворотки; нанофильтрацию, совмещенную с диафильтрацией, с помощью которой сыворотка концентрируется до 28 % - 30 % сухих веществ и деминерализуется до 50% содержания солей; выпаривание, совмещенное с кристаллизацией лактозы, при которой происходит концентрация сыворотки до 55 % сухих веществ и кристаллизация 80 % от всей изначальной лактозы; центрифугирование, при котором отделяется 50 % от изначальной лактозы.



1 – насос; 2 – фильтр; 3 – охладитель; 4 – резервуар; 5 – сепаратор; 6 – пастеризационно-охладительная установка; 7 – подогреватель; 8 – нанофильтрационная установка; 9 – кристаллизатор-выпариватель; 10 – винтовой насос; 11 – центрифуга

Рисунок 15 – Аппаратурная схема производства частично делактозированной деминерализованной сыворотки на основе кристаллизатора-выпаривателя

Для увеличения продолжительности хранения целесообразно подвергать полученную в результате центрифугирования (рисунок 15) сыворотку, дальнейшей сушке. Проведена сравнительная оценка состава сухой частично делактозированной деминерализованной сыворотки, полученной известным и предлагаемым способом (таблица 2). Если сравнить полученный продукт по процентному содержанию белка, лактозы и золы, то предлагаемый способ позволяет получить продукт с высоким содержанием белка (25,8 %) и пониженным содержанием золы (11 %). Содержание лактозы в предлагаемом продукте (58 %) мало отличается от женского молока и приближается по составу к коровьему, поэтому полученный продукт может быть использован на предприятии в производстве традиционных, например, кисломолочных продуктов.

Таблица 2 – Состав сухой частично делактозированной деминерализованной сыворотки на 10 т исходного продукта

| Продукт             | Единицы измерения | Влага | Лактоза | Белок | Зола  | Прочее | Всего |
|---------------------|-------------------|-------|---------|-------|-------|--------|-------|
| Предлагаемый способ | %                 | 4,00  | 57,99   | 25,8  | 10,76 | 1,45   | 100,0 |
|                     | кг                | 13,8  | 200     | 89,00 | 37,1  | 5      | 344,9 |
| Известный способ    | %                 | 4,00  | 40,37   | 33,68 | 19,43 | 2,52   | 100,0 |
|                     | кг                | 7,93  | 80      | 66,75 | 38,5  | 5      | 198,2 |

Эффективность белкового обмена в организме зависит не только от количества, принимаемого с пищей белка, но и от его аминокислотного состава. Различные белки обладают неодинаковой пищевой ценностью. Полагают, что, чем ближе аминокислотный состав принимаемого пищевого белка к аминокислотному составу белков тела, тем выше его биологическая ценность. Недостаток незаменимых аминокислот может привести к серьезным нарушениям белкового обмена в организме, развитию отрицательного азотистого баланса, истощению, остановке роста, нарушениям функции нервной системы и др. К незаменимым аминокислотам относятся: триптофан, лизин, лейцин, валин, фенилаланин, метионин, изолейцин и треонин. Состав идеального белка по незаменимым аминокислотам, по данным ФАО/ВОЗ, представлен в таблице 3. Для наиболее объективной оценки степени оптимальности состава продуктов используют такой общепринятый показатель, как аминокислотный скор, который основан на сравнении аминокислотного

состава белка оцениваемого продукта с аминокислотным составом стандартного (идеального) белка.

Известно, что комбинированные продукты, в частности, состоящие из отрубей и частично делактозированной деминерализованной сыворотки, имеют высокую пищевую ценность. Рассмотрим с точки зрения соотношения незаменимых аминокислот пшеничные отруби и частично делактозированную деминерализованную сыворотку (лактоза – 46 %, белок – 34 %, зола – 14 %), представленные в таблице 3.

Таблица 3 – Аминокислотный состав и скор продуктов в граммах на 100 граммов белка

| Состав белка продуктов                        | Лейцин | Изолейцин | Триптофан | Треонин | Лизин | Валин | Метионин+ цистин | Фенилаланин+ тирозин | $\Sigma$ |
|---|--------|-----------|-----------|---------|-------|-------|------------------|----------------------|----------|
| Идеальный белок ФАО/ВОЗ                       | 7      | 4         | 1         | 4       | 5,5   | 5     | 3,5              | 6                    | 36       |
| Белок пшеничных отрубей                       | 6,5    | 3,9       | 0,8       | 2,5     | 1,8   | 3,8   | 1,4              | 5,1                  | 25,8     |
| Аминокислотный скор пшеничных отрубей         | 0,93   | 0,98      | 0,80      | 0,63    | 0,33  | 0,76  | 0,40             | 0,85                 | 0,72     |
| Белок молочной сыворотки                      | 11,3   | 6,5       | 2,5       | 5,6     | 11,5  | 5,5   | 5,6              | 6,3                  | 54,8     |
| Аминокислотный скор молочной сыворотки        | 1,61   | 1,63      | 2,50      | 1,40    | 2,09  | 1,10  | 1,60             | 1,05                 | 1,52     |
| Белок комбинированного продукта               | 7,8    | 4,25      | 2,11      | 4,07    | 6,22  | 5,17  | 4,59             | 6,92                 | 41,13    |
| Аминокислотный скор комбинированного продукта | 1,11   | 1,06      | 2,11      | 1,02    | 1,13  | 1,03  | 1,31             | 1,15                 | 1,14     |

Как видно из таблицы, белок молочной сыворотки насыщен незаменимыми аминокислотами значительно больше, чем белок пшеничных отрубей. На это указывает и аминокислотный состав и аминокислотный скор. Используя метод наименьших квадратов, определим, в каком соотношении должны присутствовать отруби и сыворотка в комплексном продукте.

В качестве критерия ценности продукта по незаменимым аминокислотам выберем минимум квадрата невязок между содержанием каждой из восьми незаменимых аминокислот в грамме идеального продукта и рассматриваемого продукта. Для этого найдем сумму квадратов невязок, или отклонений содержания каждой из аминокислот в смеси, состоящей из  $n$  продуктов от аминокислотного состава идеального продукта:

$$E = \sum_{i=1}^8 \left[ a_{i \text{ НАК. СТ.}} - \frac{\sum_{j=1}^n a_{i,j \text{ НАК. ИССЛ.}} \cdot x_j}{\sum_{j=1}^n x_j} \right]^2, \quad (5)$$

где  $x_j$  – составная часть  $j$ -го продукта в смеси;

$a_{i,j \text{ НАК. ИССЛ.}}$  – содержание  $i$ -той незаменимой аминокислоты в 1 грамме белка  $j$ -того исследуемого продукта, мгм;

$a_{i \text{ НАК. СТ.}}$  – содержание  $i$ -той незаменимой аминокислоты в 1 грамме идеального стандартного белка, мгм.

Минимум квадрата невязок достигается при условии  $\frac{dE}{dx_j} = 0$ . В результате получим систему из  $n$  линейных уравнений с  $n$  неизвестными. Для двух смешиваемых продуктов  $n = 2$ , минимум квадрата невязок даст два линейных уравнения относительно двух неизвестных  $x_1$  и  $x_2$ :

$$\begin{cases} \frac{dE}{dx_1} = \frac{d \sum_{i=1}^8 \left[ a_i \text{ НАК. СТ.} - \frac{a_{i,1} \text{ НАК. ИССЛ.} \cdot x_1 + a_{i,2} \text{ НАК. ИССЛ.} \cdot x_2}{x_1 + x_2} \right]^2}{dx_1} = 0 \\ \frac{dE}{dx_2} = \frac{d \sum_{i=1}^8 \left[ a_i \text{ НАК. СТ.} - \frac{a_{i,1} \text{ НАК. ИССЛ.} \cdot x_1 + a_{i,2} \text{ НАК. ИССЛ.} \cdot x_2}{x_1 + x_2} \right]^2}{dx_2} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

В результате решения уравнения (6) получим оптимальное соотношение компонентов  $x_1$  и  $x_2$

$$\frac{x_1}{x_2} = \frac{\sum_{i=1}^8 (a_i \text{ НАК. СТ.} - a_{i,2} \text{ НАК. ИССЛ.}) \cdot (a_{i,2} \text{ НАК. ИССЛ.} - a_{i,1} \text{ НАК. ИССЛ.})}{\sum_{i=1}^8 (a_i \text{ НАК. СТ.} - a_{i,1} \text{ НАК. ИССЛ.}) \cdot (a_{i,1} \text{ НАК. ИССЛ.} - a_{i,2} \text{ НАК. ИССЛ.})}, \quad (7)$$

Расчеты по данным таблицы 4 для пшеничных отрубей и сыворотки дают  $x_{1\text{бел}}/x_{2\text{бел}}=2,6$ . Тогда в 100 граммах белка смеси будет содержаться 72 г белков отрубей и 28 г белков сыворотки.

Учитывая, что частично делактозированная деминерализованная сыворотка, имеет в своем составе 34 % белка, а пшеничные отруби 14,4 %, то соотношение продуктов  $x_{1\text{прод}}/x_{2\text{прод}}=(2,6 \cdot 100/14,4)/(1 \cdot 100/34)=6,14$ .

Сравнение пищевой ценности пшеничных отрубей, частично делактозированной деминерализованной сыворотки и комбинированного продукта представлено в таблице 4. При этом у комбинированного продукта значительно повышается процент от суточной нормы потребления белков по сравнению с пшеничными отрубями. Если вернуться к таблице 2 и сравнить аминокислотный скор отдельных продуктов, а именно, пшеничных отрубей, молочной сыворотки и комбинированного продукта, то можно видеть, что использование белков сыворотки для обогащения пищевых продуктов помогает повысить пищевую ценность каждого из продуктов: пищевых отрубей – в 1,4 раза и самой сыворотки – в 1,1 раза.

Таблица 4 – Пищевая ценность продукта из пшеничных отрубей и делактозированной деминерализованной молочной сыворотки

| Продукт  |                  | Лейцин | Изолейцин | Триптофан | Треонин | Лизин | Валин  | Метионин + цистин | Фенилаланин + тирозин |
|--|------------------|--------|-----------|-----------|---------|-------|--------|-------------------|-----------------------|
| Суточная норма потребления белков                      |                  | 4,94   | 2,00      | 0,8       | 2,4     | 4,11  | 2,5    | 3,6               | 8,8                   |
| Пшеничные отруби                                       | В 100 г          | 0,93   | 0,49      | 0,28      | 0,5     | 0,6   | 0,605  | 1,03              | 0,371                 |
|  | процент от нормы | 20,2   | 24,3      | 35,3      | 20,8    | 14,6  | 16,801 | 11,7              | 20,6                  |
|  | В 85,92г         | 0,78   | 0,41      | 0,24      | 0,42    | 0,50  | 0,51   | 0,886             | 0,86                  |
| Молочная сыворотка                                     | В100 г           | 3,31   | 1,90      | 0,73      | 1,64    | 3,37  | 1,64   | 1,85              | 1,85                  |
|  | процент от нормы | 72,2   | 95,3      | 91,85     | 68,4    | 82,1  | 35,32  | 24,21             | 24,21                 |
|  | В 14,08 г        | 0,54   | 0,31      | 0,12      | 0,27    | 0,55  | 0,27   | 0,3               | 0,3                   |
| 85,92 г пшеничных отрубей + 14,08 г молочной сыворотки | В 100 г          | 1,32   | 0,72      | 0,36      | 0,69    | 1,05  | 0,78   | 1,186             | 1,16                  |
|  | процент от нормы | 28,65  | 35,86     | 44,47     | 28,53   | 24,54 | 21,66  | 13,46             | 14,66                 |

В таблице 5 представлены энергозатраты на производство частично делактозированной деминерализованной молочной сыворотки при 2-х различных способах производства и соответствующем аппаратном оформлении. Известный способ получения частично делактозированной деминерализованной сыворотки с применением вакуум аппарата Виганд 2000, кристаллизатора КМСР-72 и электродиализной установки Молога-1М, требует на переработку 10 т сыворотки 12745 рублей. В предлагаемом нами способе с применением нанофильтрационной установки ТСВНФ5 и разработанного кристаллизатора-выпаривателя затраты на переработку 10 т продукции составляют 4499 рублей, что в 2,8 раза меньше затрат на производство частично делактозированной деминерализованной сыворотки по известной технологии.

Таблица 5 – Сравнительная оценка энергозатрат на производство частично делактозированной деминерализованной молочной сыворотки

| Параметр                                   |                        | Известный способ        |                         |                        | Предлагаемый способ                   |                              |
|--|------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|---------------------------------------|------------------------------|
| Операции на аппаратах                      |                        | Электродиализ Молога-1М | Выпаривание Виганд 2000 | Кристаллизация КМСР-72 | Нанофильтрация + диафильтрация ТСВНФ5 | Кристаллизация + выпаривание |
| Затраты энергии на обработку 1 т сыворотки | Пар, Гкал              | -                       | 0,26                    | -                      | -                                     | -                            |
|  | Вода, м3               | -                       | 9                       | 21,6                   | 0,1                                   | -                            |
|  | Эл. энергия, кВт·ч     | 5                       | 1,35                    | 26,4                   | 5,1                                   | 54,1                         |
| Стоимость энергозатрат                     | Пар, руб/Гкал          | 2000                    | -                       | 580                    | -                                     | -                            |
|  | Водоснабжение, руб/м3  | 35                      | -                       | 346,5                  | 42,35                                 | 3,5                          |
|  | Водоотведение, руб/ м3 | 24                      | -                       | 237,6                  | 29                                    | 2,4                          |
|  | Эл. энергия, руб/кВт·ч | 7,5                     | 1,77                    | 11,1                   | 26,4                                  | 38,25                        |
| Всего на 1 т сыворотки, руб                |                        | 1,77                    | 1175,2                  | 97,75                  | 44,15                                 | 405,75                       |
|  |                        |                         | 1274,72                 |                        | 449,9                                 |                              |
| Всего на 10 т сыворотки, руб               |                        |                         | 12745                   |                        | 4499                                  |                              |

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1) Теоретически установлено, что при одновременном нагревании кристаллизата воздухом с температурой 60 °С и водой с температурой 70 °С, при расходе горячего воздуха 0,0009 м<sup>3</sup>/с, максимальная температура, достигаемая кристаллизатом составляет 62 °С; при одновременном охлаждении кристаллизата воздухом с температурой 0 °С и водой с температурой 1°С, при расходе холодного воздуха 0,0003 м<sup>3</sup>/с, минимальная температура кристаллизата составляет 1,3 °С; при 24-часовом периоде работы содержание сухих веществ в сыворотке может достигать 63 %.

2) Экспериментально установлено, что оптимальным режимом работы кристаллизатора является первоначальное сгущение НФ-концентрата до содержания сухих веществ как минимум 50 % с последующим проведением циклической кристаллизации. При циклической кристаллизации (4 цикла) при температуре горячей воды 70 °С, температуре холодной воды 4 °С – 6 °С,

кристаллизат нагревается до 67 °С, а охлаждается до 8 °С, при этом степень кристаллизации достигает 65 % при среднем размере кристалла 120 мкм.

3) Разработана методика инженерного расчета, рассчитан и изготовлен кристаллизатор-выпариватель с воздушным и водяным охлаждением и подогревом, вместимостью 5 л кристаллизата, с коэффициентом теплопередачи между теплоносителем и кристаллизатом для горячей воды – 323 Вт/(м<sup>2</sup>·К), для холодной воды – 238,6 Вт/(м<sup>2</sup>·К).

4) Разработана математическая модель процессов теплообмена, выпаривания и кристаллизации лактозы в кристаллизаторе с воздушным и водяным охлаждением и подогревом с циклическими температурными режимами работы, позволяющая определить температурные режимы работы, содержание растворенных сухих веществ, процент выкристаллизованной лактозы, показатель скорости кристаллизации в каждый момент времени в зависимости от физико-химических свойств кристаллизата, от расхода воздуха и его термодинамических свойств, и от термодинамических свойств теплоносителя, подаваемого в рубашку.

5) Испытания созданной пилотной установки показали, что в процессе сгущения НФ-концентрата творожной сыворотки, который происходил при температуре от 49,4 °С до 56 °С и продолжался 9 часов, сухие вещества возросли до 49,4 %. При этом степень кристаллизации лактозы составила 38 % от исходных сухих веществ. В процессе 8-ми часовой циклической кристаллизации выкристаллизовалось 81,4% от исходного количества лактозы.

6) Разработана усовершенствованная линия производства частично делактозированной деминерализованной сыворотки и предложено ее аппаратное оформление, позволяющее повысить степень деминерализации до 50 %, выкристаллизовать 70 % и отделить 50 % от изначальной лактозы.

7) Разработана методика оптимизации аминокислотного состава пищевого продукта на основе метода наименьших квадратов. Спроектирован 2-х компонентный сывороточно-злаковый продукт с оптимальным аминокислотным составом, состоящий из частично делактозированной деминерализованной сыворотки и пшеничных отрубей с соотношением компонентов 1:6,1.

8) Расчет показал, что энергозатраты на переработку 10 т сыворотки по предлагаемой технологии составляют 4499 рублей, что в 2,8 раз меньше затрат по известной технологии.

### **Список работ, опубликованных по теме диссертации**

#### **Публикации в рецензируемых научных изданиях:**

1. Куленко, В.Г. Модель роста кристалла в пересыщенных растворах/ В.Г. Куленко, Е.А. Фиалкова, Н.Я. Дыкало, **Е.В. Славорова** // Молочнохозяйственный вестник [Электронный ресурс] : электронный период. теорет. и науч.-практ. журнал / ред. А.Л. Бирюков; ФГБОУ ВПО ВГМХА имени Н. В. Верещагина. – Вологда-Молочное. – 2014.- с. 58-66. – Режим доступа: <http://molochnoe.ru/journal>.
2. Куленко, В.Г. Анализ тепло-массообменных процессов в кристаллизаторе с циклическими температурными режимами/ В.Г. Куленко, Е.А. Фиалкова, **Е.В. Славорова** // Молочнохозяйственный вестник [Электронный ресурс] : электронный период. теорет. и науч.-практ. журнал / ред. В. В. Беляев ; ФГБОУ ВПО ВГМХА имени Н. В. Верещагина. – Вологда-Молочное. – 2014. –с.64-68. – Режим доступа: <http://molochnoe.ru/journal>.

3. Фиалкова, Е.А. Анализ влияния циклического режима работы кристаллизатора с воздушным охлаждением и подогревом на скорость роста кристаллов/ Е.А. Фиалкова, В.Г. Куленко, **Е.В. Славоросова** [и др.] // Молочнохозяйственный вестник [Электронный ресурс] : электронный период. теорет. и науч.-практ. журнал / ред. А.Л. Бирюков ; ФГБОУ ВПО ВГМХА имени Н. В. Верещагина. – Вологда-Молочное. – 2015. – с.87-95. – Режим доступа : <http://molochnoe.ru/journal>.
4. **Славоросова, Е.В.** Интенсификация процесса кристаллизации лактозы в сгущённой молочной сыворотке/ Е.В. Славоросова, В.Г. Куленко, В.Б. Шевчук [и др.] // Молочнохозяйственный вестник [Электронный ресурс] : электронный период. теорет. и науч.-практ. журнал / ред. А.Л. Бирюков ; ФГБОУ ВПО ВГМХА имени Н. В. Верещагина. – Вологда-Молочное. – 2016 №2 (22). – С.109-116. – Режим доступа: <http://molochnoe.ru/journal>.
5. **Славоросова, Е.В.** Кристаллизатор-выпариватель для переработки молочной сыворотки/ Е.В. Славоросова, В.Г. Куленко, В.Б. Шевчук [и др.] // Молочнохозяйственный вестник [Электронный ресурс] : электронный период. теорет. и науч.-практ. журнал / ред. А.Л. Бирюков; ФГБОУ ВПО ВГМХА имени Н. В. Верещагина. – Вологда-Молочное. – 2016. №3 (23). – С.76-83. – Режим доступа: <http://molochnoe.ru/journal>.
6. **Славоросова, Е.В.** Экспериментальные исследования процесса сгущения нанопольфилтраты молочной сыворотки с сопутствующей кристаллизацией лактозы/ Е.В. Славоросова, В.Г. Куленко, В.Б. Шевчук [и др.] // Молочнохозяйственный вестник [Электронный ресурс] : электронный период. теорет. и науч.-практ. журнал / ред. А.Л. Бирюков ; ФГБОУ ВПО ВГМХА имени Н. В. Верещагина. – Вологда-Молочное. – 2016. №3 (23). – С.84-90. – Режим доступа: <http://molochnoe.ru/journal>.
7. Шутро, Р.В. Совершенствование процесса концентрирования творожной сыворотки нанопольфилтрацией/Р.В. Шутро, В.Б. Шевчук В.Г. Куленко, **Е.В. Славоросова** // Молочнохозяйственный вестник [Электронный ресурс] : электронный период. теорет. и науч.-практ. журнал / ред. А.Л. Бирюков ; ФГБОУ ВПО ВГМХА имени Н. В. Верещагина. – Вологда-Молочное. – 2018. №2 (30). – С.122-129. – Режим доступа:<http://molochnoe.ru/journal>.

#### **Статьи и материалы конференций:**

8. **Славоросова, Е.В.** Оптимизация конструкции кристаллизатора[Текст]/ Е.В. Славоросова, Е.А. Фиалкова//«Первая ступень в науке». Сборник трудов ВГМХА по результатам работы II Ежегодной научно- практической студенческой конференции (технологический факультет) [электронный ресурс].– Вологда–Молочное: 2013.– С.16-22.
9. Фиалкова, Е.А. Энергоэффективная технология производства сгущенной делактозированной деминерализованной сыворотки[Текст]/ Е.А. Фиалкова, Н.Я. Дыкало, **Е.В. Славоросова** // Научные и практические аспекты совершенствования качества продуктов детского и геродиетического питания. Материалы 4-й международной практической конференции (В двух томах.Том II).-Истра: 2014. С. 351-356.
10. **Славоросова, Е.В.** Научное обоснование перспективного направления переработки молочной сыворотки [Текст]/ Е.В. Славоросова, В.Г. Куленко, Е.А. Фиалкова [и др.] Инновационные тенденции развития российской науки: материалы VIII Международной научно-практической конференции молодых ученых/под общ. ред. А.Г.Миронова; Краснояр. гос. аграр. ун-т. –Красноярск. -2015. с.251-254.
11. **Славоросова, Е.В.** Энергоэффективный способ получения низколактозной деминерализованной молочной сыворотки [Текст]/ / Е.В. Славоросова, В.Г. Куленко, В.Б. Шевчук [и др.] // Актуальная биотехнология. – Биоактуаль (Воронеж).-2015. № 3 (14). –С. 82-83.
12. **Славоросова, Е.В.** Деминерализованная делактозированная творожная сыворотка как продукт экспорта для предприятий молокоперерабатывающей отрасли/Е.В., Славоросова, В.Б. Шевчук, В.Г. Куленко, В.И. Баронов, Е.А. Фиалкова// Приоритетные направления развития регионального экспорта продукции АПК [Электронный ресурс]: материалы Международной научно-практической конференции (13-20 ноября 2019 г., Красноярск) / Краснояр. гос. аграр. ун-т. – Красноярск, 2019. –С. 124-128.

13. Шевчук, В.Б. Теоретическая модель роста кристалла лактозы в пересыщенном растворе с учетом броуновского движения[Текст]/ В.Б. Шевчук, В.Г. Куленко, Е.А. Фиалкова, **Е.В. Славорова**// Актуальные вопросы молочной промышленности, межотраслевые технологии и системы управления качеством. 2020.т. 1. №1 (1). С.617-626.
14. Фиалкова, Е.А. Экспериментальные исследования процесса концентрирования творожной сыворотки на базе нанофильтрационной установки/ Фиалкова Е.А., **Е.В. Славорова**, В.Б. Шевчук // Биотехнологические основы получения и применения природных биологически активных веществ» (Нарочанские чтения - 12): материалы Международной научно-практической конференции (14 октября 2020 г.)/Минск – Ставрополь: Белорусский государственный университет, Северо-Кавказский федеральный университет, 2020. – С.179-184.
15. Фиалкова, Е.А. Оптимизация термо-и гидродинамических условий в кристаллизаторе с воздушным охлаждением и подогревом путем компьютерного моделирования[Текст]/Е.А.Фиалкова, В.Б. Шевчук, **Е.В. Славорова**, Слободин А.А., Кочергин К.А.//Безопасность и качество сельскохозяйственного сырья и продовольствия. Сборник статей Всероссийской научно-практической конференции./Москва, 2020. – С.750-754.
16. Фиалкова, Е.А.Новый способ переработки молочной сыворотки[Текст]/ Е.А.Фиалкова, **Е.В. Славорова**, В.Б. Шевчук // Современные достижения биотехнологии. Техника, технологии и упаковка для реализации инновационных проектов на предприятиях пищевой и биотехнологической промышленности: материалы VII Международной научно-практической конференции/ Пятигорск: Издательство ПФ СКФУ, 2020. – Т II. – С.145-152.
17. **Славорова, Е.В.** Один из путей переработки молочной сыворотки на пищевые цели[Текст]/ / Е.В. Славорова, Е.А.Фиалкова, В.Б. Шевчук// Сборник: Актуальные вопросы развития аграрного сектора экономики байкальского региона. Материалы Всероссийской(национальной) научно-практической конференции, посвященной Дню Российской науки. Улан-Удэ, 2021. – С.332-336 .

#### **Изобретения:**

18. Кристаллизатор-выпариватель [Текст]: Пат. № 2590755 Рос. Федерация, МПК С13В30/02/ Куленко В.Г., Шевчук В.Б., **Славорова Е.В.**, Фиалкова Е.А.; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВО "Вологодская государственная молочнохозяйственная академия имени Н.В.Верещагина"; заявл.06.04.2015; опубл.10.07.2016.
19. Способ переработки молочной сыворотки [Текст]: Пат. № 2617940 Рос. Федерация, МПК В01D9/00, В01D61/02, А23С21/00, А23С7/04, А23С1/14 /Куленко В.Г., Шевчук В.Б., **Славорова Е.В.**, Дыкало Н.Я., Фиалкова Е.А.; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВО "Вологодская государственная молочнохозяйственная академия имени Н.В.Верещагина"; заявл.18.03.2015; опубл.28.04.2017.