

На правах рукописи



**ПАВЕЛЬЕВА Дарья Анатольевна**

**СУХОЙ СЫВОРОТОЧНЫЙ ПЕРМЕАТ ДЛЯ  
ПРИМЕНЕНИЯ В ПИЩЕВЫХ ПРОИЗВОДСТВАХ:  
ТЕХНОЛОГИЯ, СОСТАВ, СВОЙСТВА**

Специальность: 4.3.3. Пищевые системы

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Воронеж – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Воронежский государственный университет инженерных технологий»

**Научный руководитель:** **Мельникова Елена Ивановна**  
доктор технических наук, профессор

**Официальные оппоненты:** **Тихомирова Наталья Александровна**  
доктор технических наук, профессор,  
ГОУ ВО МО «Государственный социально-гуманитарный университет», профессор кафедры физики и химии факультета математики, физики, химии, информатики

**Куликова Ирина Кирилловна**  
кандидат технических наук, доцент,  
ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет», доцент кафедры прикладной биотехнологии факультета пищевой инженерии и биотехнологий имени академика А.Г. Храмова

**Ведущая организация:** ФГБОУ ВО «Вологодская государственная молочнохозяйственная академия имени Н.В. Верещагина»

Защита состоится «08» июня 2026 года в 09 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.398.07 при ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет» по адресу: 355017, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1, корп. 20, ауд. 309.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет» по адресу: 355017, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1, НБ 226 и на сайте: <https://ncfu.ru/upload/medialibrary/672/wkmc9b1xkikbtlioq5ne2fne10n0ddu/w/Dissertatsiya-Paveleva-D.A..pdf>

С авторефератом можно ознакомиться на сайте СКФУ: <https://ncfu.ru/nauka/dissertatsionnye-sovety/obyavleniya-o-zashchite-dissertatsiy/34921/>

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета 24.2.398.07  
кандидат технических наук, доцент



Д.С. Мамай

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** В соответствии с Указом Президента Российской Федерации от 21 января 2020 года № 20 «Об утверждении Доктрины продовольственной безопасности Российской Федерации» уровень самообеспеченности продуктами отечественного производства должен составить не менее 90 % к 2030 году, в соответствии с данными Федеральной службы государственной статистики в 2024 году его реальное значение – 86 %. Учитывая высокую импортозависимость в сегменте сыровоточных ингредиентов для различных отраслей пищевой промышленности на фоне осложнения внешнеполитической ситуации, целесообразна разработка конкурентоспособной технологии качественной продукции со стабильным составом и физико-химическими свойствами.

Актуальность работы обусловлена растущими объемами производства белковых молочных продуктов и, как следствие, - молочной сыворотки, более 200 млн т которой ежегодно вырабатывается в мире. В нашей стране производится до 14 млн т. в год, из которых 50-60 % приходится на подсырную сыворотку, которая поступает на дальнейшую переработку.

Перспективным рецептурным ингредиентом ряда ассортиментных групп пищевых продуктов является сухой сыровоточный пермеат, поскольку основной его компонент лактоза характеризуется низким гликемическим индексом (ГИ 46) и коэффициентом сладости 0,4-0,6 по отношению к сахарозе. Сухой сыровоточный пермеат улучшает внешний вид изделий и позволяет осуществить частичную или полную замену сахара белого, однако, высокая зольность и наличие солоноватого привкуса затрудняет его использование в пищевых продуктах.

Таким образом, научное обоснование, разработка и внедрение эффективной и конкурентоспособной технологии сухого сыровоточного пермеата, с учетом практических рекомендаций для его применения в различных отраслях пищевой промышленности является актуальной и значимой.

**Степень разработанности темы.** Развитие пищевой промышленности в условиях дефицита сырья актуализировало вопросы полного использования исходных ресурсов, в том числе побочных, к которым можно отнести молочную сыворотку. В результате появился ряд исследований, посвященных проблематике переработки сыворотки, фракционирования компонентов и получения новых ингредиентов на ее основе, как отечественных, так и зарубежных авторов: А.Г. Храмова, Н.Н. Липатова, В.Д. Харитонов, И.А. Евдокимова, С.А. Рябцевой, О.В. Дымара, Л.А. Забодоловой, Н.А. Тихомировой, Т. Huppertz, S. Nielsen, A. Merkel, и др. Вместе с тем, проблема рационального использования лактозосодержащего сырья и разработки продуктов на его основе остается актуальной.

Исследования по теме диссертационной работы выполнялись при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение № 075-11-2022-020 от 07.04.2022 г., ИГК 000000S407522QO40002, в рамках Постановления Правительства РФ № 218.

**Цель и задачи исследований.** Целью работы является совершенствование традиционной технологии сухого сывороточного пермеата для расширения сферы его применения в пищевом производстве.

Для достижения поставленной цели определены следующие задачи:

– на основе анализа состава и свойств сухого сывороточного пермеата, в том числе с учетом требований ISO и стандарта «Кодекс Алиментариус», сформулировать комплекс физико-химических (в т. ч. с учетом минерального профиля) и микробиологических показателей для обеспечения его качества и безопасности;

– обосновать корректировку действующей технологии сывороточного пермеата за счет введения новых технологических операций – двухстадийной деминерализации с применением нанофильтрации и электродиализа;

– исследовать термодинамические характеристики, соотношение свободной и связанной влаги в сухом деминерализованном сывороточном пермеате для оценки возможности его применения при производстве десертных продуктов;

– разработать рецептурно-компонентные решения и технологические рекомендации по применению сухого деминерализованного сывороточного пермеата в производстве продуктов питания;

– провести промышленную апробацию и внедрение в производство технологии сухого сывороточного пермеата, десертных продуктов с его использованием, рассчитать экономическую эффективность предложенной технологии.

**Научная новизна.** Обоснован комплекс требований (физико-химические, реологические свойства, показатели качества и безопасности) для сухого сывороточного пермеата, расширяющие сферы его применения в пищевом производстве.

По результатам проведенных исследований подобраны режимы производства сухого сывороточного пермеата, включающие дополнительную технологическую операцию – двухстадийную деминерализацию за счет применения нанофильтрации и электродиализа для получения сухого деминерализованного сывороточного пермеата с массовой долей золы в сухом веществе  $0,56 \pm 0,04$  %.

Получены новые данные о технологических характеристиках, химическом составе, физико-химических свойствах, динамике изменения ка-

качественного и количественного состава микрофлоры сухого деминерализованного сывороточного пермеата на различных этапах производства продукта с высокими показателями качества и безопасности, соответствующие требованиям ISO и «Кодекс Алиментариус».

**Теоретическая и практическая значимость.** Разработана последовательность технологических операций для получения сухого сывороточного пермеата со степенью деминерализации не менее 90 %, позволяющая расширить сферы его применения в пищевом производстве, в частности в десертных продуктах, кондитерских изделиях.

Даны рекомендации по использованию сухого сывороточного пермеата со степенью деминерализации не менее 90 % в производстве продуктов питания и предложены рецептурно-компонентные решения фруктового мармелада и мороженого, позволяющие осуществить замену сахаразы.

Утверждены комплект документов ТУ 10.51.55-030-00426012-2019 «Продукт сывороточный сухой (пермеат)» и технологическая инструкция. Технология сухого деминерализованного сывороточного пермеата внедрена в условиях филиала ПАО Молочный комбинат «Воронежский» «Калачеевский сырзавод» (г. Калач Воронежской области). Экономическая и технологическая целесообразность предложенных решений подтверждена следующими показателями: маржинальный доход при реализации продукта внутри страны в расчете на 1 тонну составил 32 728 руб., уровень рентабельности по маржинальному доходу составляет 48 %, внутренняя норма рентабельности проекта составляет 20 %.

Основные положения диссертационного исследования внедрены в учебный процесс при реализации дисциплин: «Пищевые добавки функционального назначения» и «Технология функциональных продуктов животного происхождения» направления подготовки бакалавров 19.03.03 «Продукты питания животного происхождения»; «Технологии переработки вторичных сырьевых ресурсов молочной отрасли» направления подготовки магистров 19.04.03 «Продукты питания животного происхождения».

**Методология и методы исследования.** Методы исследований - стандартные и общепринятые в исследовательской практике, а также модифицированные, усовершенствованные и специальные, выполненные с применением современных приборов и информационных технологий для оценки свойств сырья, полуфабрикатов и продукции.

**Положения, выносимые на защиту:**

- химический состав, физико-химические, микробиологические показатели и минеральный профиль на различных этапах мембранной фильтрации подсырной сыворотки и готового сухого сывороточного пермеата;

- технологические режимы и технология получения сухого сывороточного пермеата, включающая дополнительные операции двухэтапной деминерализации (нанофильтрация, электродиализ), откорректированные температурные режимы вакуум-выпаривания, позволяющие получить готовый продукт с заданными физико-химическими, функционально-технологическими характеристиками и степенью деминерализации не менее 90 %;

- новые рецептурно-компонентные решения для пищевых производств, предусматривающие замену сахарозы сухим деминерализованным сывороточным пермеатом.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Подтверждение достоверности результатов проведенных исследований базируется на доказательствах и использовании апробированных математических методов. Полученные результаты характеризуются высокой воспроизводимостью, взаимной согласованностью экспериментально полученных значений, корректной статистической обработкой результатов.

Основные положения работы, выводы и рекомендации доложены и обсуждены на конференциях, научно-практических форумах различного уровня: международных (Ставрополь, 2020, 2021; Керчь, 2022; Воронеж, 2017, 2018, 2022, 2023, 2024; Могилев, 2023; Минск, 2023), всероссийских (Воронеж, 2021) и на отчетных научных конференциях ВГУИТ 2020, 2021, 2022, 2023, 2024.

Результаты настоящей работы представлены на конкурсах и выставках: международная выставка инновационных продуктов и технологий (Воронеж, 2018), выставка «Продукты здорового питания – новый тренд пищевой промышленности» (Воронеж, 2022), конкурс научно-исследовательских работ в сфере молочной отрасли (Вологда, 2023), VIII международная выставка изобретений и инноваций имени Н.Г. Славянова (Воронеж, 2023), выставка в рамках XI Международной научно-технической конференции «Продовольственная безопасность: научное, кадровое и информационное обеспечение» (Воронеж, 2024), награждены дипломами.

По теме диссертации опубликована 21 научная работа, в том числе 3 статьи в журналах, включенных в перечень ВАК при Минобрнауки РФ для публикации результатов диссертационных исследований, 3 статьи в журналах, входящих в международные базы данных Scopus и Web of Science.

**Структура и объем работы.** Текст диссертации изложен на 143 страницах, содержащих введение, 4 главы экспериментального и аналитического материала, заключение, список литературы и приложения. Список литературы включает 195 наименований, в том числе 89 иностранных источников. Приложения к диссертации представлены на 11 страницах.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования, рассмотрена степень разработки научной проблемы, сформулированы цель и задачи диссертационной работы, научная новизна предложенных решений, практическая значимость.

**В главе 1 «Переработка сыворотки в мире и Российской Федерации»** представлены результаты анализа текущего объема ресурса и структуры комплексной переработки молочной сыворотки в отрасли. Установлена необходимость совершенствования и внедрения конкурентноспособных технологий качественной продукции со стабильным химическим составом и реологическими свойствами с учетом импортозависимости в сегменте пищевых ингредиентов. На основании информационно-патентного поиска и литературных данных подтверждена актуальность темы и обоснованы объекты исследования.

**В главе 2 «Методы и методики экспериментальных исследований»** приведена общая схема поэтапного выполнения экспериментальных и исследовательских работ (рисунок 1). Объектами на различных этапах в соответствии с целью и задачами выбраны: сывороточные пермеаты, полученные после ультрафильтрации, нанофильтрации, электродиализа, сгущения на вакуум-выпарной установке (ВВУ) и распылительной сушки; молоко сухое обезжиренное с м.д. жира не более 1,5 % и молоко сухое цельное с м.д. жира не менее 26,0 % в соответствии с ГОСТ 33629-2015; сыворотка молочная деминерализованная сухая (ГОСТ Р 56833-2015); сахар белый кристаллический свекловичный, изготовленный по ГОСТ 33222-2015; сахар молочный (ГОСТ 33567-2015), а также полученные с добавлением сухого деминерализованного сывороточного пермеата продукты (мармелад, мороженое). Экспериментальные исследования проводились в соответствии с арбитражными и общепринятыми в исследовательской практике методами. Анализ гранулометрического состава выполняли согласно ISO 13320:2020 «Гранулометрический анализ. Методы лазерной дифракции» на приборе Beckman Coulter. Процесс смачивания и растворения сухих ингредиентов изучали с использованием иммерсионной микроскопии (Микроскоп Альтами БИО 1, адаптер для камеры Canon) с 200-кратным увеличением препаратов, подготовленных по методу «раздавленная капля». Содержание аномерных форм лактозы в образцах определяли при помощи поляриметра KRUSS P1000-LED. Исследования форм связи влаги и процесса термического разложения проводили методами дифференциального термического анализа (ДТА) и термогравиметрии (ТГ) на приборе синхронного термического анализа STA 449 F3 Jupiter. Содержание 5-гидроксиметилфурфузола определяли фотометрическим методом Винклера с использованием спектрофотометра ПЭ - 5400УФ.



Рисунок 1 - Общая схема проведения исследований

Исследования выполняли в научно-исследовательских лабораториях и испытательных центрах: центр коллективного пользования «Контроль и управление энергоэффективных проектов», кафедра технологии продуктов животного происхождения ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий»; испытательная лаборатория «МОЛОКО» ФГАНУ «ВНИМИ»; ФБУ «Государственный региональный центр стандартизации, метрологии и испытаний в г. Санкт-Петербурге и Ленинградской области» (ФБУ «Тест-С.-Петербург»); ФБУ «Государственный региональный центр стандартизации метрологии и испытаний в г. Москве и Московской области» (ФБУ «Ростест-Москва»), ПАО Молочный комбинат «Воронежский».

**В главе 3 «Совершенствование технологии производства сывороточного пермеата»** сформирован комплекс требований (таблица 1), который ограничивает применение сухого сывороточного пермеата в пищевом производстве.

Таблица 1 – Рекомендации по совершенствованию технологии сухого сывороточного пермеата

Показатели	Недостатки сухого сывороточного пермеата, выработанного по традиционной технологии	Технологические операции позволяющие провести корректировку	Преимущества предложенной технологии
Органолептические	Соленый вкус	Двухстадийный процесс деминерализации: нанофильтрация, электродиализ	Отсутствие соленого вкуса в готовом продукте; Сладковатый привкус
Физико-химические	М.д. золы 6,5-12,0 %; Высокое содержание натрия, хлора; Низкое содержание лактозы		М.д. золы менее 1,0 %; Содержание лактозы не менее 85 %
Функционально-технологические	Индекс растворимости; Смачиваемость; Насыпная плотность; Группа чистоты	ВВУ Режимы сушки	Повышение индекса растворимости; смачиваемости
Микробиологические	Высокая обсемененность	Микрофильтрация, электродиализ	Улучшение микробиологических показателей

По результатам анализа основных физико-химических показателей, наиболее востребованных коммерчески доступных образцов сухого сывороточного пермеата отечественных и зарубежных компаний установлено, что оптимальное соотношение «зола/лактоза» в сухом сывороточном пермеате, позволяющее расширить возможность его применения в технологиях пищевых продуктов, находится в пределах до 0,01. Для достижения этого значения предложена корректировка традиционной технологии сухого сывороточного пермеата с учётом изменения действующих режимов и введения новых технологических операций для получения продукта с заданными потребительскими характеристиками.

Совершенствование технологии производства сухого деминерализованного сывороточного пермеата требует анализа изменения химического состава и минерального профиля исходного сырья и полуфабрикатов на различных этапах технологического процесса переработки подсырной сыворотки: ультрафильтрация, нанофильтрация, электродиализ (таблица 2). Ультрафильтрация с полимерными мембранами (предельная молекулярная масса 10 кДа) при  $P=0,13\pm 0,02$  МПа и  $t=10-15$  °С, позволила сконцентрировать белки подсырной сыворотки и частично очистить от минеральных веществ УФ-концентрат, при этом в полученный УФ-пермеат перешли большая часть лактозы и соли, преимущественно в ионно-молекулярном состоянии.

Таблица 2 - Химический состав и содержание минеральных веществ подсырной сыворотки и продуктов ее переработки

Наименование показателя	Подсырная сыворотка	Ультрафильтрация		Нанофильтрация		Электродиализ
		УФ-концентрат	УФ-пермеат	НФ-концентрат	НФ-пермеат	
Массовая доля сухих веществ, %	6,33±0,05	27,8±0,07	4,21±0,03	21,56±0,07	0,24±0,02	21,40±0,09
Массовая доля лактозы, %	4,43±0,36	7,54±0,40	3,48±0,33	20,21±0,53	0,23±0,13	20,83±0,51
Массовая доля белка, %	0,84±0,03	19,54±0,16	0,16±0,02	0,27±0,03	-	0,26±0,02
Массовая доля зола, %	0,52±0,04	0,62±0,03	0,37±0,03	1,02±0,04	0,04±0,03	0,04±0,02
Содержание хлоридов, мг/100 г	0,87±0,03	1,32±0,05	0,86±0,04	1,98±0,05	2,16±0,04	0,58±0,02
Содержание кальция, мг/100 г	21,32±0,15	156,18±0,41	48,61±0,19	189,79±0,44	86,24±0,23	17,58±0,12
Содержание общего фосфора, мг/100 г	64,36±0,05	138,54±0,10	44,39±0,03	173,53±0,11	76,26±0,06	49,19±0,05
Содержание натрия, мг/100 г	54,21±0,02	141,58±0,08	106,96±0,06	539,63±0,76	183,73±0,15	16,35±0,003
Содержание калия, мг/100 г	193,4±0,10	177,1±0,09	198,5±0,12	794,80±0,95	205,28±0,16	36,84±0,007
Содержание железа, мг/кг	0,46±0,03	2,3±0,05	0,42±0,02	0,37±0,02	2,26±0,11	0,13±0,01
Содержание магния, мг/кг	28,7±0,28	6,3±0,05	3,71±0,05	6,87±0,06	9,90±0,15	3,9±0,04
Содержание меди, мг/кг	0,294±0,03	0,28±0,02	0,276±0,02	0,14±0,007	0,23±0,01	0,05±0,004

Нанофильтрация эффективна для удаления части минеральных солей из УФ-пермеата и увеличения концентрации лактозы в образцах НФ-концентратов. С целью оптимизации процесса была построена математическая модель, которая имеет вид уравнения регрессии, найденного статистическими методами на основе результатов экспериментальных исследований. В качестве основных факторов, влияющих на процесс нанофильтрации ультрафильтрационного пермеата подсырной сыворотки, были выбраны:  $X_1$  – температура, °С;  $X_2$  – содержание сухих веществ, %;  $X_3$  – объемный расход входящего сырья (УФ-пермеата), т/ч; факторы совместимы и некоррелируемы между собой. Выбор интервалов изменения факторов обусловлен технологическими параметрами, условиями работы мембранной установки, а также технико-экономическими показателями производства. Пределы изменения исследуемых факторов приведены в таблице 3. Многопараметрическая задача оптимизации была сформулирована следующим образом: найти такие значения режимных параметров процесса нанофильтрации, которые бы обеспечивали минимальное значение отношения содержания массовой доли лактозы к золе в сгущенном НФ-концентрате сывороточного пермеата при ограничениях на входные параметры. Первые 6 решений сведены в таблицу 4.

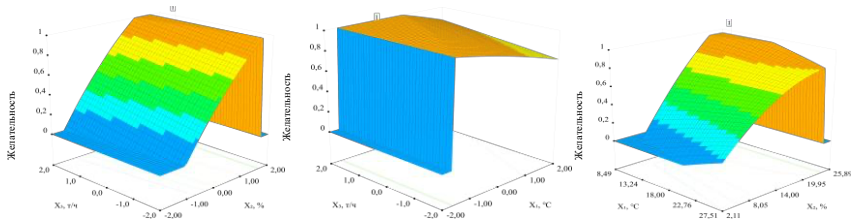
Таблица 3 - Диапазоны факторов

Условия планирования	Кодированное значение	Пределы изменения факторов		
		$X_1, ^\circ\text{C}$	$X_2, \%$	$X_3, \text{т/ч}$
Основной уровень	0	16	7,5	57,5
Верхний уровень	+1	17	10,5	63,75
Нижний уровень	-1	15	4,5	51,25
Верхняя «звездная точка»	+2	18	13,5	45,00
Нижняя «звездная точка»	-2	14	1,5	70,00

Таблица 4 - Решения задачи оптимизации

Решение	$X_1, ^\circ\text{C}$	$X_2, \%$	$X_3, \text{т/ч}$	$Y_1$	Функция желательности
1	12,459	22,989	49,385	0,012	1,000
2	20,575	23,925	55,732	0,014	1,000
3	13,373	22,377	40,573	0,014	1,000
4	10,864	23,671	55,707	0,011	1,000
5	19,162	23,657	50,934	0,014	1,000
6	11,293	23,259	30,734	0,014	1,000

Из массива решений  $D$  выбраны значения  $D \rightarrow 1$  (рисунок 2), по которым установлены рациональные интервалы значений входных факторов:  $X_1 = 10,8 \dots 20,5 ^\circ\text{C}$ ;  $X_2 = 22,7 \dots 23,7 \%$ ;  $X_3 = 30,7 \dots 55,7 \text{ т/ч}$ .

Рисунок 2 - Определение функции желательности  $D$  для заданных критериев оптимизации  $X_1, X_2, X_3$ 

Параметры нанофильтрации ( $P=2,50 \pm 0,02 \text{ МПа}$ ,  $t=10 \pm 2 ^\circ\text{C}$ ) обеспечили более высокую степень очистки от хлоридов без существенной потери молочного сахара, при этом сгущение НФ-концентрата до массовой доли сухих веществ не менее  $21,5 \pm 0,5 \%$  позволило перейти в НФ-пермеат части лактозы (1 %), кальция (30 %), фосфора (20 %), калия (25 %), хлоридов (50 %), железа (80 %), магния (70 %) и меди (85 %). Для НФ-концентрата общая зольность снизилась на 25,4 % в сравнении с УФ-пермеатом подсырной сыворотки, а минеральный профиль изменился в сторону увеличения концентрации  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ .

Трехстадийный процесс электродиализа проводили при температуре  $t=(15 \pm 2) ^\circ\text{C}$  с использованием ионоселективных мембран. Этап I осуществляли с отрицательно заряженной мембраной в течение 4 ч. Этап II

представлял собой процесс нейтрализации до 7,0 рН в течение 2 ч. Этап III проходил с положительно заряженной мембраной в течение 25 мин до достижения электропроводности  $0,8 \pm 0,05 \text{ мС} \cdot \text{см}^{-1}$ . Применение электродиализа для дальнейшей деминерализации НФ-концентрата подсырной сыворотки позволило добиться удаления  $\text{Na}^+$  и  $\text{K}^+$  на 89-94 %, а  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  на 60-75 %; общего фосфора - на 78 %; хлоридов - на 70 %.

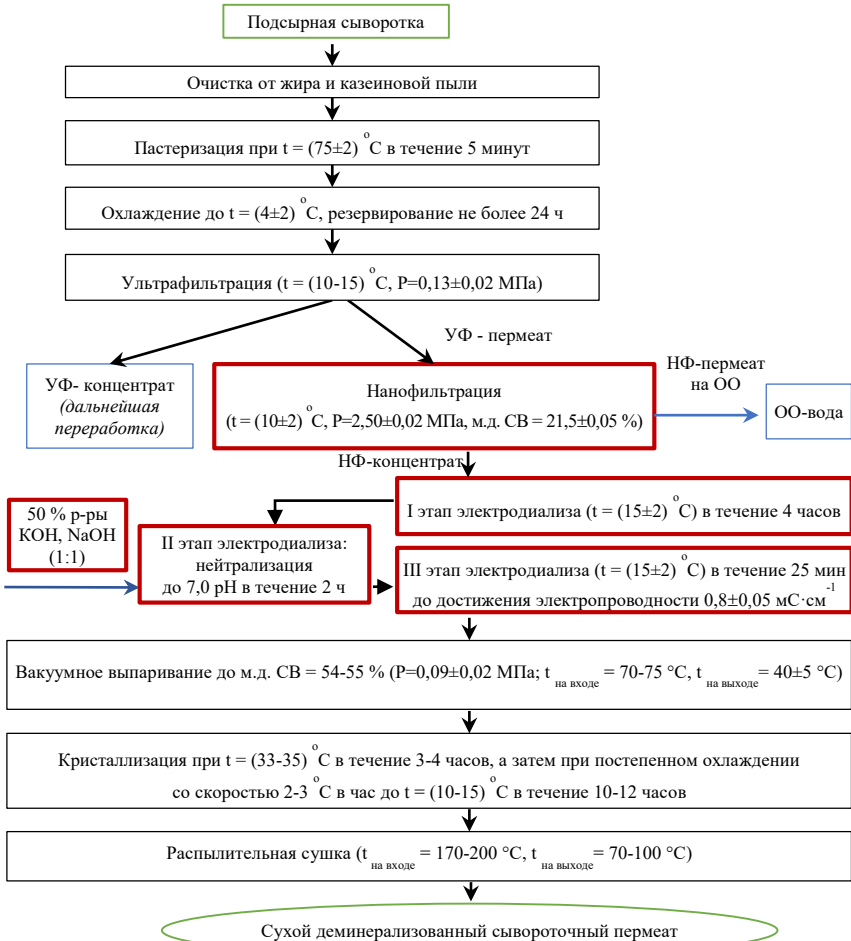


Рисунок 3 – Схема переработки подсырной сыворотки

Полученные результаты подтвердили высокую степень деминерализации образцов и рациональность последовательного применения методов ультра-, нанофильтрации (с полимерными мембранами) и электродиализа. Общее содержание неорганических ионов было снижено более чем на 93,0 %. В процессе вакуум-выпаривания, кристаллизации и сушки существенных изменений минерального состава не происходило. Предложена последовательность технологических операций для производства сухого деминерализованного сывороточного пермеата (рисунок 3).

Анализ гранулометрического состава полученного образца приведён на рисунке 4.

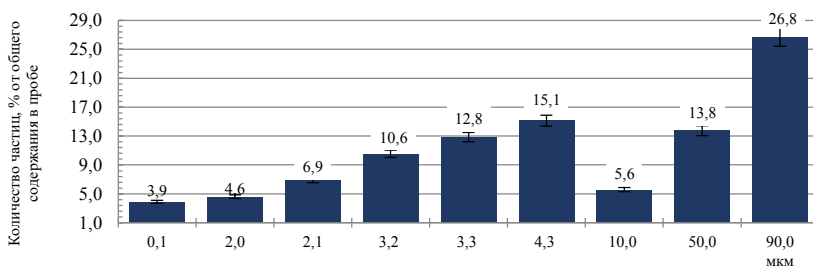


Рисунок 4 - Гранулометрический состав сухого деминерализованного сывороточного пермеата

Средний размер частиц сухого деминерализованного сывороточного пермеата составил 54-58 мкм.

Установленные физико-химические показатели сухого деминерализованного сывороточного пермеата (таблица 5) доказывают возможность его применения в производстве различных ассортиментных групп продуктов.

Проведены исследования по изучению микрофлоры подсырной сыворотки на различных технологических этапах ее переработки (таблица 6). Предложенная последовательность технологических операций позволила снизить количество микроорганизмов более чем на 90 %.

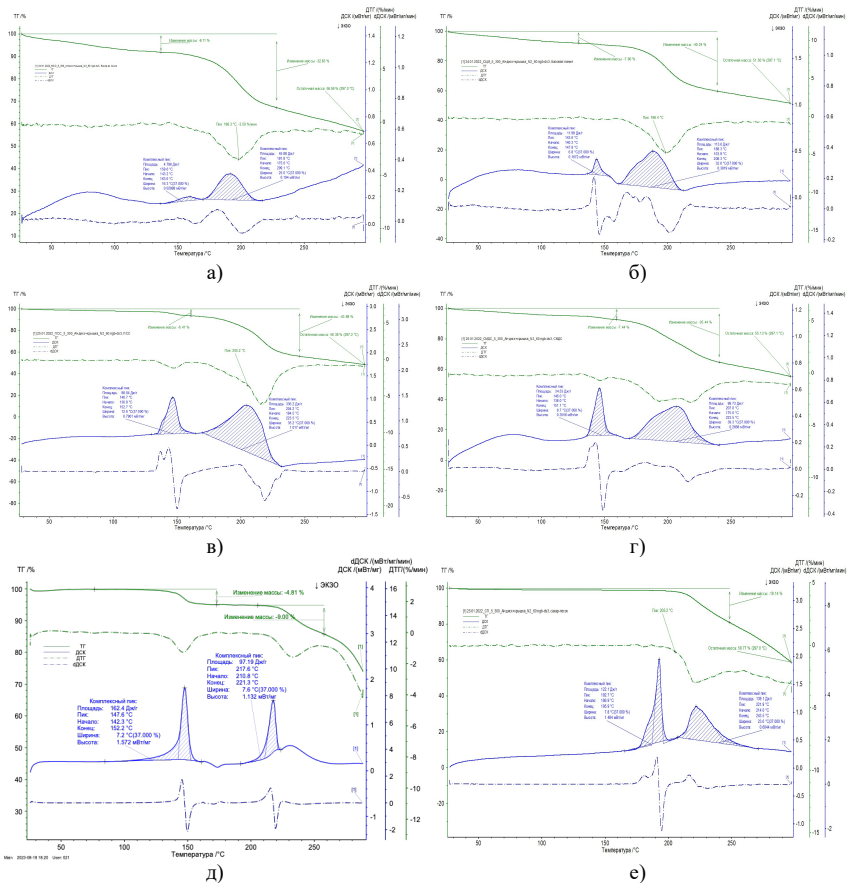
Для оценки возможности применения сухого деминерализованного сывороточного пермеата при производстве продуктов с пониженным гликемическим индексом изучены термодинамические характеристики и соотношение свободной и связанной влаги методами дифференциального термического анализа (ДТА) и термогравиметрии (ТГ). Вид термограмм представлен специфическими кривыми (рисунок 5).

Таблица 5 - Физико-химические показатели сухого деминерализованного сывороточного пермеата

Наименование показателя	Величина
Массовая доля сухих веществ, %	97,73 ± 0,50
Массовая доля общего белка, %	2,31 ± 0,22
Массовая доля лактозы, %	90,60 ± 0,70
Массовая доля жира, %	Менее 0,01
Массовая доля золы, %	0,55 ± 0,04
Содержание хлоридов, мг/100 г	3,57 ± 0,06
Содержание кальция, мг/100 г	81,7 ± 0,21
Содержание общего фосфора, мг/100 г	215,5 ± 0,10
Содержание натрия, мг/100 г	88,60 ± 0,04
Содержание калия, мг/100 г	159,2 ± 0,06
Содержание железа, мг/кг	Менее 1,0
Содержание магния, мг/кг	168,3 ± 0,48
Содержание меди, мг/кг	0,17 ± 0,01
Активная кислотность	6,22 ± 0,04
Группа чистоты	I
Объемная насыпная плотность, г/см <sup>3</sup>	0,68 ± 0,1
Рыхлая насыпная плотность, г/см <sup>3</sup>	0,76 ± 0,1
Насыпная плотность, г/см <sup>3</sup>	0,81 ± 0,1
Индекс растворимости, см <sup>3</sup> сырого осадка	0,10 ± 0,25
Пригорелые частицы (диск)	A/B
Диспергируемость, %	80,6 ± 4,0 % относ.
Смачиваемость, %	62,0 ± 4,0 % относ.

Таблица 6 - Микробиологические показатели подсырной сыворотки на различных этапах технологической переработки

Образец	КМАФАнМ, КОЕ/см <sup>3</sup> или г	Дрожжи, КОЕ/см <sup>3</sup> или г	Споровые палочки рода <i>Bacillus</i>	Титр бактериофага (по методу Аппельмана)
Подсырная сыворотка-сырье	5 · 10 <sup>3</sup>	19	23	10 <sup>-5</sup>
Подсырная сыворотка обезжиренная, после пастеризации	400	2	11	10 <sup>-6</sup>
Сывороточный пермеат при резервировании перед выпариванием	80	0	6	10 <sup>-7</sup>
Сгущенный сывороточный пермеат	560	0	3	10 <sup>-7</sup>
Сывороточный пермеат в процессе кристаллизации	650	0	7	10 <sup>-7</sup>
Сухой деминерализованный сывороточный пермеат	400	0	0	10 <sup>-7</sup>



а) молоко сухое обезжиренное; б) сухое цельное молоко;  
 в) сухой деминерализованный сывороточный пермеат;  
 г) сыворотка молочная деминерализованная сухая; д) сахар молочный (лактоза);  
 е) сахар белый.

Рисунок 5 - Термограммы исследованных образцов

Обнаружено присутствие лактозы в кристаллической форме преимущественно с одновременным присутствием определенного соотношения аномерных форм в исследуемых образцах молочной продукции (таблица 7).

Таблица 7 – Химический состав исследуемых лактозосодержащих ингредиентов

Наименование показателя	Сухое цельное молоко	Сухое обезжиренное молоко	Сухой деминерализованный сывороточный пермеат	Сыворотка молочная деминерализованная сухая	Сахар молочный (лактоза)
Массовая доля влаги, %	4,1±0,2	4,6±0,2	2,3±0,3	4,2±0,3	1,1±0,15
Массовая доля лактозы в СВ, %	32,2±0,7	53,0±0,7	92,7±0,7	80,5±0,7	98,5±0,7
β-форма, % от общего содержания лактозы	18,6±0,7	9,3±0,7	14,4±0,7	15,5±0,7	2,0±0,7
Общий белок в СВ, %	32,8±0,22	33,0±0,22	2,4±0,30	12,5±0,30	0,1±0,04
Массовая доля жира в СВ, %	25,5±0,20	1,5±0,10	-	1,0±0,10	-
Массовая доля золы в СВ, %	5,5±0,15	8,0±0,15	0,56±0,15	2,0±0,15	0,3±0,05

Плавный изгиб кривой с диапазоном температур от 40 до 120 °С обусловлен результатами испарения поверхностных вод и попадания в поры и капилляры анализируемых образцов. Первые эндотермические пики при температуре около 135 °С являются результатом моногидратной десорбции или относятся к удалению гидратообразующей воды, сопровождающейся поглощением тепла и изменением массы образцов на кривых ТГ. Площадь пика dДСК пропорциональна изменению энтальпии реакции и изменению массы образцов и обратно пропорциональна их теплопроводности.

Множественные пики на кривых dДСК от 135 до 170 °С для лактозосодержащих ингредиентов (рисунок 5 а-г) указывают на возможное протекание реакции Майяра в смеси с белками одновременно с потерей кристаллизационной воды лактозой. Небольшие экзотермические пики на кривых dДСК, без потери массы, в диапазоне температур 165-190 °С, могут характеризовать превращение аморфной лактозы в кристаллическую.

Эндотермические пики при температуре около 205-225 °С относятся к аномеризации α-формы лактозы в β-форму с последующим плавлением и разложением компонентов. Резкое снижение массы наблюдалось в интервале температур 215-245 °С, что может быть вызвано разложением элементарных побочных компонентов, а также указывать на разрушение кристаллической структуры. Пики на кривой ДСК лактозы (рисунок 5 д) отражают потерю кристаллизационной воды (130–180 °С), аномеризацию α-формы в β-форму (182–235 °С) и плавление с последующим разложением (235–263 °С). Видимый процесс дегидратации образца сахара белого

(рисунок 5 е) наступил уже при 185-187 °С и продолжался до конечной температуры с общей потерей массы 41,23 %.

На рисунке 6 приведена зависимость степени превращения  $\alpha$  от температуры  $T$ , К, рассчитанная в соответствии с термогравиметрическими кривыми для нескольких температурных интервалов. S-образная форма свидетельствует о трехступенчатом процессе дегидратации с различной скоростью высвобождения воды и ее сложном характере взаимодействия с другими компонентами исследованных образцов. Отличие кривой степени превращения для сахара белого и сахара молочного (лактозы) связано с химическим составом и разрывом водородных связей перед плавлением кристаллической структуры, в которую заключены химически связанные молекулы воды.

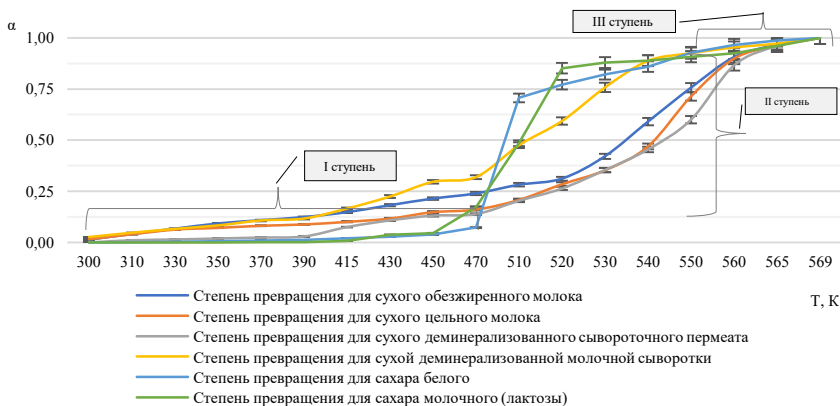


Рисунок 6 - Зависимость превращения вещества  $\alpha$  от температуры

Специфические особенности химического состава испытуемых образцов определили различные соотношения влаги. Для сухого деминерализованного сывороочного пермеата количество химически связанной воды составляло  $56,11 \pm 1 \%$ , что близко по значению к сухому цельному молоку ( $59,86 \pm 1 \%$ ), молочной сыворотки деминерализованной ( $64,56 \pm 1 \%$ ), сухому обезжиренному молоку ( $67,17 \pm 1 \%$ ) и позволяет провести их замещение без каких-либо дополнительных технологических операций. Замена сахара белого лактозой, как основного компонента сухого деминерализованного сывороочного пермеата, может привести к различиям в функционально-технологических свойствах пищевых систем и потребовать корректировки некоторых операций. Ограничивающим фактором такой замены является более низкая сладость лактозы и термическая стабильность продуктов, содержащих ее (разложение сахарозы

происходит при 210–260 °С, а в других исследуемых образцах сухих молочных продуктов - при 215–245 °С).

**В главе 4 «Прикладные аспекты использования сухого деминерализованного сывороточного пермеата»** предложено рецептурно-компонентное решение фруктового мармелада с полной заменой сахара белого сухим деминерализованным сывороточным пермеатом и разработана технологическая схема для его производства. Физико-химические показатели готового продукта представлены в таблице 8. Контрольным выбран образец формованного мармелада «Ароматный».

Таблица 8 - Физико-химические показатели изученных образцов

Наименование показателя	Содержание	
	Опытный образец	Контрольный образец
Массовая доля сухих веществ, %	70,10 ± 0,4	82,00 ± 0,4
Кислотность, град	13,24 ± 2,5	17,40 ± 2,5
Массовая доля редуцирующих веществ, %	18,60 ± 1,0	34,10 ± 1,0
Массовая доля золы, %	0,05 ± 0,007	0,05 ± 0,007
Плотность, г/см <sup>3</sup>	1,22 ± 0,01	0,98 ± 0,01
Массовая доля общей сернистой кислоты, %	0,01 ± 0,002	0,01 ± 0,002

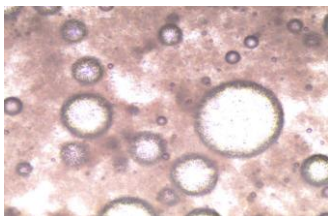
Применение сухого деминерализованного сывороточного пермеата в технологиях кондитерских изделий позволяет получить продукт, соответствующий требованиям ГОСТ 6442-2014, со сниженным гликемическим индексом без дополнительных технологических операций, а также обеспечить формирование требуемых структурно-механических и органолептических свойств, оказывая положительное влияние на консистенцию и структуру, вкус, цвет готового мармелада.

Другое направление - использование сухого деминерализованного сывороточного пермеата в качестве заменителя сахара белого в рецептуре ванильного мороженого. Характеристика химического состава и свойств опытного образца в сравнении с контрольным (мороженое пломбир ванильный изготовленное в соответствии с требованиями ГОСТ 31457-2012) приведена в таблице 9.

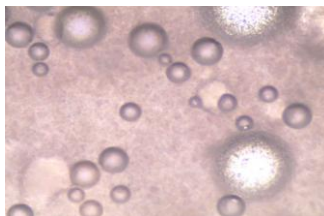
Таблица 9 - Химический состав и свойства ванильного мороженого с сухим деминерализованным сывороточным пермеатом

Наименование показателя	Содержание	
	Опытный образец	Контрольный образец
Массовая доля сухих веществ, %	29,01 ± 0,3	29,25 ± 0,3
Массовая доля белка, %	3,51 ± 0,06	3,03 ± 0,06
Массовая доля жира, %	3,7 ± 0,5	3,7 ± 0,5
Массовая доля сахарозы, %	-	14,36 ± 0,5
Массовая доля лактозы, %	20,46 ± 0,8	6,49 ± 0,8
Степень взбитости, %	82,0 ± 8,2	87,5 ± 8,8
Кислотность, °Т	25,0 ± 1,5	22,0 ± 1,5

Электронная микросъемка структуры контрольного образца (рисунок 7, а) показала наличие небольших жировых шариков и белковых частиц с равномерным распределением по всему объёму, а также видимое количество неагрегированного мицеллярного материала.



а) контрольный образец



б) опытный образец

Рисунок 7 – Микроструктура изученных образцов мороженого (увеличение 20x75)

Увеличение содержания лактозы обеспечило появление на микроснимке опытного образца специфических форм кристаллов льда (рисунок 7, б), крупных и четких жировых глобул, без явно выраженной агрегации белковых мицелл, что является нормальным распределением фаз мороженого.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Установлен комплекс требований к сухому деминерализованному сыровоточному пермеату (отсутствие соленого вкуса, сладковатый привкус; массовая доля золы менее 1,0 %; массовая доля лактозы не менее 85 %) и предложена корректировка традиционной технологии сухого сыровоточного пермеата с учётом изменения действующих режимов и введения новых технологических операций для получения продукта с заданными потребительскими характеристиками.

2. Изучен минеральный профиль, степень деминерализации в опытных образцах и доказана эффективность последовательного применения методов ультрафильтрации, нанофильтрации и электродиализа для производства сухого деминерализованного сыровоточного пермеата. Применение ультрафильтрации с полимерными мембранами позволило частично удалить  $\text{Ca}^{2+}$ , общий фосфор и  $\text{Mg}^{2+}$  из подсырной сыровотки; нанофильтрация с полимерными мембранами была эффективна в удалении части  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$  и общего фосфора из УФ-пермеата; ЭД позволил удалить остаточные моновалентные ионы  $\text{Na}^+$  и  $\text{K}^+$  на 89-94 %, а  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  на 60-75 %; общего фосфора - на 78 %; хлоридов - на 70 % из НФ-концентрата. На основании этого предложено последовательное применение и

обоснованы технологические режимы ультрафильтрации ( $t=(10-15) \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $P=0,13\pm 0,02 \text{ МПа}$ ), нанофильтрации ( $t=(10\pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $P=2,5\pm 0,02 \text{ МПа}$ , м.д. СВ =  $21,5\pm 0,5 \%$ ), электродиализа ( $t=15\pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ ) до достижения электропроводности  $0,8\pm 0,05 \text{ мС}\cdot\text{см}^{-1}$ ) с применением полимерных мембран для получения сухого сывороточного пермеата со степенью деминерализации не менее 90 % и подтверждено изменение качественного и количественного состава микрофлоры на различных этапах производства (пастеризация подсырной сыворотки снизила бактериальную обсемененность на 92 %; мембранная обработка - на 80 %, содержание бактериофагов в 100 раз).

3. Определены физико-химические показатели готового продукта (индекс растворимости -  $0,1 \pm 0,25 \text{ см}^3$ , насыпная плотность -  $0,81\pm 0,1 \text{ г/см}^3$ , диспергируемость -  $80,6 \pm 4,0 \%$  относ., смачиваемость -  $62,0 \pm 4,0 \%$  относ., средний размер частиц - 54-58 мкм). Установлены термодинамические характеристики и соотношение свободной и связанной влаги в исследуемых образцах, обеспечивающие возможность применения сухого деминерализованного сывороточного пермеата в рецептурах хлебобулочных и кондитерских изделий (для сухого деминерализованного сывороточного пермеата количество химически связанной воды составило  $(56,11 \pm 1 \%)$ , близкое по значению к молочной сыворотке деминерализованной ( $64,56 \pm 1 \%$ ).

4. Разработанные рецептурно-компонентные решения фруктового мармелада и мороженого с добавлением сухого деминерализованного сывороточного пермеата позволяют провести 100 % замену сахарозы.

5. Усовершенствованная технология сухого деминерализованного сывороточного пермеата внедрена в условиях филиала ПАО Молочный комбинат «Воронежский» «Калачеевский сырзавод» (г. Калач Воронежской области). Экономическая и технологическая целесообразность предложенных решений подтверждена следующими показателями: маржинальный доход при реализации продукта внутри страны в расчете на 1 тонну составил 32 728 руб., уровень рентабельности по маржинальному доходу составляет 48 %, внутренняя норма рентабельности проекта составляет 20 %.

**Содержание работы отражено в следующих основных публикациях:**

**Статьи в рецензируемых научных изданиях,  
рекомендованных ВАК при Минобрнауки России:**

1. Мельникова, Е. И. Мировой и российский рынок сыровоточных ингредиентов / Е. И. Мельникова, Е. В. Богданова, Д. А. Павельева // Молочная промышленность. – 2020. – № 8. – С. 56-58.
2. Мельникова, Е. И. Состав и функционально-технологические свойства пермеата подсырной сыворотки / Е. И. Мельникова, Е. В. Богданова, Д. А. Павельева // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2022. – № 1. – С. 223-232. – DOI 10.36107/spfr.2022.276.
3. Павельева, Д.А. Сыровоточный пермеат: микробиологические показатели на различных этапах производства / Д. А. Павельева, Е. В. Богданова, Е. С. Рудниченко, Е. И. Мельникова // Молочная промышленность. – 2023. – № 5. – С. 19-20. – DOI 10.21603/1019-8946-2023-5-14.

**Статьи в журналах, входящих в международные базы данных  
Scopus и Web of Science:**

4. Melnikova, E.I. Chemical composition, functional and technological (processing) properties of whey ingredients / E.I. Melnikova, E.V. Bogdanova, D.A. Paveleva // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Michurinsk, 12 апреля 2021 года. – Michurinsk, 2021. – P. 012017. – DOI 10.1088/1755-1315/845/1/012017.
5. Melnikova, E.I. Sucrose, Lactose, Thermogravimetry, and Differential Thermal Analysis: The Estimation of the Moisture Bond Types in Lactose-Containing Ingredients for Confectionery Products with Reduced Glycemic Index / E. I. Melnikova, E. V. Bogdanova, D. A. Pavelieva, I. A. Saranov // International Journal of Food Science. – 2023. – Vol. 2023. – P. 8835418. – DOI 10.1155/2023/8835418.
6. Melnikova, E.I. Whey Permeate Mineral Profile at Various Stages of Membrane Filtration / Melnikova EI, Bogdanova EV, Paveleva DA. // Appl Food Biotechnol. – 2023. – 10 (4): 223-231. <http://dx.doi.org/10.22037/afb.v10i4.42664>

**Статьи и материалы конференций:**

7. Мельникова, Е. И. Концепция направленного изменения состава и свойств подсырной сыворотки / Е. И. Мельникова, Е. В. Богданова, Д. А. Корнеева (Павельева), А. С. Воронина // Новое в технологии и технике функциональных продуктов питания на основе медико-биологических воззрений: Материалы VI Международной научно-технической конференции, Воронеж, 11–12 декабря 2017 года / Минобрнауки РФ, ФГБОУ ВО «ВГУИТ». – Воронеж: ВГУИТ, 2017. – С. 105-108.

8. Мельникова, Е. И. Применение мембранных технологий для переработки молочной сыворотки / Е. И. Мельникова, Е. В. Богданова, Д. А. Корнеева (Павельева) // Инновационные технологии в пищевой промышленности: наука, образование и производство: материалы V Международной научно-технической конференции, Воронеж, 16 ноября 2018 года. – Воронеж: ВГУИТ, 2018. – С. 467-469.

9. Павельева, Д. А. Исследование форм связи влаги с белками в УФ-концентрах подсырной сыворотки / Д. А. Павельева, Е. И. Мельникова, Е. В. Богданова // Материалы студенческой научной конференции за 2019 год: в 2 частях, Воронеж, 08–12 апреля 2019 года; Под общей редакцией О.С. Корнеевой. Том Часть 1. – Воронеж: ВГУИТ, 2019. – С. 21-23.

10. Мельникова, Е. И. Применение пермеата подсырной сыворотки в технологии пасты для мучных кондитерских изделий / Е. И. Мельникова, Е. В. Богданова, Д. А. Павельева // Современные достижения биотехнологии: материалы VII Международной научно-практической конференции, Ставрополь-Пятигорск, 20–24 октября 2020 года. Том 2. – Пятигорск: Пятигорский филиал СКФУ, 2020. – С. 39-42.

11. Мельникова, Е.И. Состав и свойства ингредиентов, полученных из подсырной сыворотки / Е.И. Мельникова, Д. А. Павельева // Материалы LIX отчетной научной конференции преподавателей и научных сотрудников ВГУИТ за 2020 год, Воронеж, 08–09 февраля 2021 года / под ред. О.С. Корнеевой; Воронеж. гос. ун-т инж. технол. Том Часть 1. – Воронеж: ВГУИТ, 2021. – С. 39.

12. Мельникова, Е.И. Гранулометрический состав и физико-химические свойства сывороточного пермеата / Е.И. Мельникова, Д.А. Павельева, Е.В. Богданова, Е.Д. Шабанова // Современные достижения биотехнологии. Глобальные вызовы и актуальные проблемы переработки и использования вторичных сырьевых ресурсов агропромышленного комплекса России: Материалы VIII Международной научно-практической конференции, Ставрополь, 21–24 июня 2021 года / Под редакцией И.А. Евдокимова, А.Д. Лодыгина. – Ставрополь: ООО «Бюро новостей», 2021. – С. 192-194.

13. Ponomarev, A.N. The Rehydration Ability of Whey Ingredients / A.N. Ponomarev, E. I. Melnikova, E.V. Bogdanova, D.A. Pavelieva // KNE life sciences, Yalta, Russia, 22–26 сентября 2020 года. Vol. 2022. – Dubai, UAE, 2022. – P. 418-423. – DOI 10.18502/cls.v7i1.10151.

14. Павельева, Д. А. Пермеаты из различных сырьевых источников / Д. А. Павельева, Е. И. Мельникова, Е. В. Богданова // Материалы III Национальной научно-практической конференции с международным участием, VI Международной научно-практической конференции, III Международной научно-практической конференции и Научно-практической конференции с международным участием, Донецк-Керчь-Луганск, 24–28 января 2022 года. – Керчь: ФГБОУ ВО «КГМТУ», 2022. – С. 97-98.

15. Мельникова, Е.И. Новые технологические решения в производстве кондитерских изделий с пермеатом молочной сыворотки / Е.И. Мельникова, Е.В. Богданова, Д.А. Павельева // Инновационные решения при производстве продуктов питания из растительного сырья: Сборник научных статей и докладов IV Международной научно-практической конференции, Воронеж, 12 апреля 2022 года. – Воронеж: ВГУИТ, 2022. – С. 192.

16. Мельникова, Е. И. Состав и функционально-технологические характеристики сывороточного пермеата / Е. И. Мельникова, Д. А. Павельева // Материалы LX отчетной научной конференции преподавателей и научных сотрудников ВГУИТ за 2021 год / под ред. О.С. Корнеевой; Том Часть 1. – Воронеж: ВГУИТ, 2022. – С. 20.

17. Мельникова, Е. И. Пермеаты молочного сырья как новые продукты на российском рынке / Е. И. Мельникова, Е. С. Рудниченко, Д. А. Павельева // Переработка молока. – 2022. – № 7(273). – С. 38-39.

18. Мельникова, Е.И. Применение сывороточного пермеата в технологии замороженного десерта / Е. И. Мельникова, Е. В. Богданова, Д. А. Павельева, Я. А. Дорохова // Инновационные технологии в пищевой промышленности: наука, образование и производство: VIII Международная научно-техническая конференция, Воронеж, 30 ноября 2022 года / Воронеж. гос. ун-т инж. технол. – Воронеж: ВГУИТ, 2023. – С. 199-201.

19. Мельникова, Е.И. Применение сывороточного пермеата в технологии мармелада / Е. И. Мельникова, Е. В. Богданова, Д. А. Павельева, Я. А. Дорохова // Наука, питание и здоровье: Сборник научных трудов, Минск, 29–30 июня 2023 года. – Минск: РУП «Издательский дом «Беларуская навука», 2023. – С. 380-383.

20. Мельникова, Е.И. Применение сывороточного пермеата в технологии мороженого / Е. И. Мельникова, Е. В. Богданова, Д. А. Павельева, Я. А. Дорохова // Техника и технология пищевых производств: Материалы XV Юбилейной Международной научно-технической конференции, Могилев, 19–20 апреля 2023 года. – Могилев: УО «БГУТ», 2023. – С. 266-267.

21. Мельникова, Е.И. Повышение эффективности деминерализации пермеата подсырной сыворотки / Е.И. Мельникова, Е.В. Богданова, Д.А. Павельева, Я.А. Дорохова // Инновационные технологии в пищевой промышленности: наука, образование и производство: Материалы IX Международной научно-технической конференции, Воронеж, 08 декабря 2023 года. – Воронеж: ВГУИТ, 2024. – С. 231-235.