

На правах рукописи



ХАЗОВ ДМИТРИЙ СЕРГЕЕВИЧ

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ СУХОЙ НИЗКОЛАКТОЗНОЙ
СЫВОРОТКИ**

4.3.3. Пищевые системы

4.3.5. Биотехнология продуктов питания и биологически активных веществ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Ставрополь – 2026

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Северо-Кавказский федеральный университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,
член-корреспондент Российской академии наук
Евдокимов Иван Алексеевич

Официальные оппоненты: **Фиалкова Евгения Александровна**
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры технологического
оборудования ФГБОУ ВО «Вологодская
государственная молочнохозяйственная
академия имени Н.В. Верещагина»

Мельникова Елена Ивановна
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры технологии
продуктов животного происхождения
ФГБОУ ВО «Воронежский
государственный университет
инженерных технологий»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Кемеровский
государственный университет»

Защита состоится «09» июня 2026 г. в 12-30 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 «СКФУ» по адресу: 355017, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1 и на сайте <https://ncfu.ru/upload/medialibrary/5d3/c1homofetw4rd5hx1o27mxhxo0p7j2p/Dissertatsiya-KNazov-D.S.pdf>

С авторефератом можно ознакомиться по адресу: <https://ncfu.ru/nauka/dissertatsionnye-sovety/obyavleniya-o-zashchite-dissertatsiy/34919/>

Автореферат разослан «__» _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.398.07,
кандидат технических наук, доцент



Д.С. Мамай

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

В структуре перерабатываемого молока в Российской Федерации, как и в мировой практике, доминирующую долю (около 50 %) занимает производство высокобелковых продуктов – сыров, творога и казеина. Технологический цикл получения таких продуктов неизбежно сопряжен с образованием значительных объемов вторичного сырья, основным из которых является молочная сыворотка.

Фундаментальные и прикладные аспекты переработки молочной сыворотки широко освещены в научной литературе. Однако, несмотря на высокую степень изученности ее состава и свойств, проблема полного и рационального использования молочной сыворотки остается актуальной. Это обусловлено, в первую очередь, постоянно возрастающими масштабами производства. Так, согласно отраслевой статистике, ежегодный объем производства молочной сыворотки в России превышает 3 млн тонн. Наибольшую долю, порядка 70,0 %, составляет подсырная сыворотка, которая является самым технологичным видом сырья для глубокой переработки благодаря относительной стабильности состава и физико-химических характеристик.

Одним из перспективных направлений исследований в этой области является оптимизация технологических приемов, базирующаяся на комбинации физико-химических и биотехнологических методов направленной корректировки углеводного и белкового профилей сырья. Реализация данного подхода позволяет обеспечить технологическую гибкость производства и оперативно реагировать на диверсификацию потребительского спроса. В частности, разработка режимов, обеспечивающих получение ингредиентов с пониженным содержанием лактозы, является востребованной как для создания продуктов специализированного назначения, так и для расширения линейки продуктов здорового питания.

Степень разработанности темы исследования.

Вопросами разработки эффективных технологий переработки молочной сыворотки занимаются в Северо-Кавказском федеральном университете,

Ярославском государственном институте качества сырья и пищевых продуктов, во Всероссийском НИИ маслодельной и сыродельной промышленности.

Среди ученых, проводивших исследования в сфере переработки молочной сыворотки, можно отметить Л.А. Остроумова, Э.Ф. Кравченко, В.Д. Харитонов, В.Г. Куленко, Е.А. Фиалкову, Н.Н. Липатова, П.Г. Нестеренко, А.А. Розанова, К.К. Полянского, Е.И. Мельникову, В.А. Павлова, И.А. Евдокимова и др. Большой вклад в научную основу технологий молочной сыворотки внес А.Г. Храмцов.

Цель и задачи исследования.

Цель работы: разработать научно-обоснованную технологию низколактозной сыворотки с использованием физико-химических и биотехнологических методов делактозирования сырья.

Задачи исследований:

- на основании научно-технических и литературных данных обосновать выбор кристаллизации и ферментативного гидролиза, как способов снижения содержания лактозы во вторичном молочном сырье;
- исследовать влияние степени деминерализации методом нанофльтрационной обработки на эффективность делактозирования сырья при кристаллизации;
- изучить влияние процесса промывки кристаллов лактозы на компонентный состав делактозированной сыворотки, определить оптимальные параметры промывки для повышения массовой доли белка в делактозированной сыворотке;
- сравнить эффективность деминерализации делактозированной сыворотки методом электродиализа и емкостной деионизации и обосновать выбор оптимального метода;
- исследовать влияние степени деминерализации на процесс гидролиза делактозированной деминерализованной сыворотки β -галактозидазой;
- изучить влияние компонентного состава и реологических свойств делактозированной и низколактозной сыворотки на процесс распылительной сушки и свойства сухих продуктов;

- на основании обобщенного анализа результатов исследований разработать и апробировать технологию низколактозной сыворотки распылительной сушки;
- определить показатели качества, сроки годности готового продукта и провести оценку экономической эффективности разработанной технологии.

Научная новизна.

Предложена интегрированная технология, включающая двухэтапный метод снижения содержания лактозы в молочной сыворотке: физико-химический (кристаллизация) и ферментативный (гидролиз с использованием β -галактозидазы).

Обоснованы оптимальные параметры промывки кристаллов лактозы (температура (20 – 30) °С, количество промывной воды (50 – 90) % от массы сырья), позволяющие обеспечить максимальный переход белковой фракции в делактозированную сыворотку. Впервые проведено сравнение двух методов деминерализации: электродиализа и метода мембранной емкостной деионизации, установлено, что электродиализ обеспечивает более высокую степень деминерализации (до 90 %), что делает его предпочтительным для получения продукта с повышенным содержанием белка. Доказано, что наиболее эффективно процесс ферментативного гидролиза лактозы протекает в делактозированной сыворотке со степенью деминерализации (50,0 – 70,0) %,

Доказано влияние соотношения углеводов/белок на реологические свойства систем, обуславливающие оптимальные параметры сушки низколактозной сыворотки после физико-химической и ферментативной обработки.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Теоретическую значимость представляют полученные сведения о закономерностях направленного изменения компонентного состава при делактозировании подсырной сыворотки путем кристаллизации лактозы, определяющем влиянии ионного равновесия среды в процессах ферментативного гидролиза лактозы, а также взаимосвязи белкового состава и реологических

свойств продукта, обуславливающим технологические режимы концентрирования и сушки.

Разработана технология сыворотки молочной низколактозной, деминерализованной сухой (ТУ 10.51.55.150-016-37676459-2025), апробированная на АО «Молочный комбинат «Ставропольский».

С практической точки зрения, разработанная технология позволяет расширить ассортимент продукции переработки молочной сыворотки.

Методология и методы исследования.

Исследования базируются на трудах отечественных и зарубежных авторов, посвященных получению делактозированной сыворотки. Применялись как общепринятые методы контроля качества молочных продуктов, так и специфические лабораторные методики. Для обработки экспериментальных данных использовали пакет анализа данных Microsoft Office Excel 2021, статистический анализ данных выполнялся в пакете Statistica 12.0.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Закономерности деминерализации сырья с использованием нанофильтрации, электродиализа и мембранной емкостной деионизации.
2. Закономерности перехода компонентов молочной сыворотки в межкристалльную жидкость в процессе декантирования и промывки кристаллов лактозы.
3. Результаты экспериментальных исследований ферментативного гидролиза лактозы в делактозированной сыворотке.
4. Анализ влияния компонентного состава делактозированной сыворотки на процессы сушки и функционально-технологические свойства сухих ингредиентов.

Степень достоверности и апробация результатов.

Для определения статистической значимости использовали дисперсионный анализ с апостериорным тестом Тьюки (уровень значимости $p \leq 0,05$). Эксперименты проводили в 3 – 5 повторностях.

Сравнение средних значений между экспериментальными группами проводили с применением t-критерия Стьюдента.

Основные результаты работы представлены на международных научно-практических конференциях и симпозиумах: «Актуальные проблемы прикладной биотехнологии и инженерии» (Оренбург, 2023), «Пищевые здоровьесберегающие технологии» (Кемерово, 2023), «Пищевая индустрия: инновационные процессы, продукты и технологии» (Москва, 2024), «Современные достижения биотехнологии: фундаментальные и прикладные аспекты» (Ставрополь, 2024), «Поландовские чтения» (Москва, 2025), «Современные достижения биотехнологии: вектор на технологическое лидерство» (Ставрополь, 2025).

По результатам диссертационного исследования опубликовано 12 научных работ, в том числе 3 публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Соответствие темы паспорту научной специальности. Диссертационные исследования соответствуют п. 5, 8, 11, 12, 13, 15, 20, 25, 36 паспорта специальности 4.3.3. – Пищевые системы и п. 7, 8, 11, 16, 26, 29, 30 паспорта специальности 4.3.5. – Биотехнология продуктов питания и биологически активных веществ.

Структура и объем работы. Диссертация изложена на 164 страницах, состоит из введения, 5 глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы, состоящего из 171 источника, включает 31 рисунок, 20 таблиц и 8 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлена актуальность выбранного направления. Описана теоретическая и практическая значимость работы, представлены основные положения, выносимые на защиту. Определены цель и задачи диссертационного исследования.

В первой главе приведены сведения о продуктах переработки молочной сыворотки и проведен анализ характера влияния лактозы на их свойства в рамках применяемых технологий производства.

Во второй главе описаны материалы, методы и организационная структура исследований, представленная на рисунке 1.



УД, % - уровень деминерализации

СК Л, % - степень кристаллизации лактозы

МД Л в СВ, % - массовая доля лактозы в сухом веществе

СГ, % - степень гидролиза лактозы

μПа·с - динамическая вязкость

Рисунок 1 – Структура проведения экспериментальных исследований

Объектами исследования являлись: подсырная сыворотка, ГОСТ 34352-2017; сахар молочный (лактоза) пищевой, ГОСТ 33567-2015, РФ, АО «МК «Ставропольский»»; глюкоза пищевая, ГОСТ Р 70295-2022, ООО «Роспланта», РФ; изолят сывороточных белков (ИСБ), ТУ 10.51.56.-038.00426012-2024, АО «Молвест»; β-галактозидаза *K. Lactis* Biolactase L20, Kerry Bio-Science, Франция; β-галактозидаза *K. Lactis* Mayalact L 5000, «MAYASAN A.S.», Турция.

Определение физико-химических и микробиологических показателей, функционально-технологических характеристик проводили с использованием стандартных методик, которые при необходимости модифицировали в соответствии с конкретными задачами исследования и характеристиками образцов.

В третьей главе приведены результаты исследований влияния нанопермембранной (НФ) обработки на эффективность делактозирования подсырной сыворотки методом кристаллизации, а также условия обогащения делактозированной фракции белком в процессе промывки кристаллов.

Кристаллизация лактозы в подсырной сыворотке, являющейся сложной многокомпонентной системой, протекает при создании пересыщенного раствора лактозы. При этом эффективность и кинетика кристаллизации напрямую определяются компонентным составом сухого остатка сырья, который влияет на условия достижения пересыщения, вязкость среды и рост кристаллов.

Как правило, состояние пересыщения достигается предварительным концентрированием с использованием НФ-обработки и вакуум-выпариванием, обеспечивающим повышение концентрации сухих веществ (СВ) сырья до уровня, необходимого для инициирования кристаллизации.

Процесс нанопермембранной фильтрации за счет селективной проницаемости НФ-мембран к одновалентным ионам (Na^+ , K^+) приводит к частичной деминерализации сырья, изменяя состав концентрируемой среды, что потенциально может влиять на кинетику кристаллизации лактозы.

В промышленных условиях при заданных параметрах работы НФ-установки изменение минеральной фракции зависит, главным образом, от вариабельности состава сырья, что подтверждают собственные исследования, хорошо согласующиеся с литературными данными. Фактически уровень деминерализации (УД) в промышленных условиях составляет (22,5 – 27,3) %. При этом отмечалось относительное увеличение доли высокомолекулярных фракций – истинного белка и жира в сухом остатке НФ-ретентата на фоне существенного снижения содержания небелковых азотистых соединений (до 50,0 %) и незначительных потерь лактозы.

Данные, полученные при исследовании процесса НФ с диафильтрацией (ДФ) в лабораторных условиях, свидетельствуют о том, что ДФ способствует повышению уровня деминерализации (таблица 1).

Таблица 1 – Компонентный состав сухого остатка подсырной сыворотки, концентрированной методом нано- и диафильтрации

Показатель	Сырье до НФ	Подсырная сыворотка после НФ с диафильтрацией при коэффициенте диафильтрационной воды, K _{dw} , %				
		0	10	20	30	40
Массовая доля сухих веществ, %	5,88 ± 0,15	20,70 ± 0,13	22,42 ± 0,36	22,30 ± 0,25	22,23 ± 0,19	22,27 ± 0,18
Уровень деминерализации, %	-	29,56 ± 0,35	38,83 ± 0,31	42,91 ± 0,21	45,88 ± 0,23	45,91 ± 0,15
Массовая доля в сухом остатке, %:						
- истинного белка	8,64 ± 0,06	9,11 ± 0,08	9,10 ± 0,12	9,18 ± 0,09	9,23 ± 0,11	9,35 ± 0,08
- небелкового азота	2,82 ± 0,03	2,01 ± 0,18	1,71 ± 0,13	1,58 ± 0,05	1,48 ± 0,06	1,43 ± 0,02
- лактозы	77,74 ± 0,86	80,74 ± 2,16	81,90 ± 1,59	82,32 ± 2,21	81,63 ± 2,26	82,59 ± 1,83
- лактатов	1,50 ± 0,02	1,38 ± 0,06	1,33 ± 0,03	1,31 ± 0,05	1,29 ± 0,10	1,27 ± 0,12
- золы	8,47 ± 0,11	5,97 ± 0,15	5,18 ± 0,12	4,84 ± 0,08	4,58 ± 0,13	4,58 ± 0,09
- жира	0,83 ± 0,07	0,78 ± 0,11	0,77 ± 0,09	0,77 ± 0,10	0,78 ± 0,10	0,79 ± 0,11

Однако интенсификация процесса ДФ путем увеличения количества ДФ воды приводит к возрастающим потерям лактозы, которые при K_{dw} = 40,0 % превышают 10,0 %, при незначительном повышении УД сырья. Исследование влияния УД подсырной сыворотки при НФ обработке на кристаллизацию лактозы показало, что диафильтрация даже при максимальном K_{dw}=40% не оказывает статистически значимого влияния на эффективность данного процесса.

Степень кристаллизации лактозы в сырье без НФ обработки составила менее 60,0 %, при массовой доле белка в делактозированной фракции – межкристаллической жидкости – менее 18,0 % (рисунок 2).

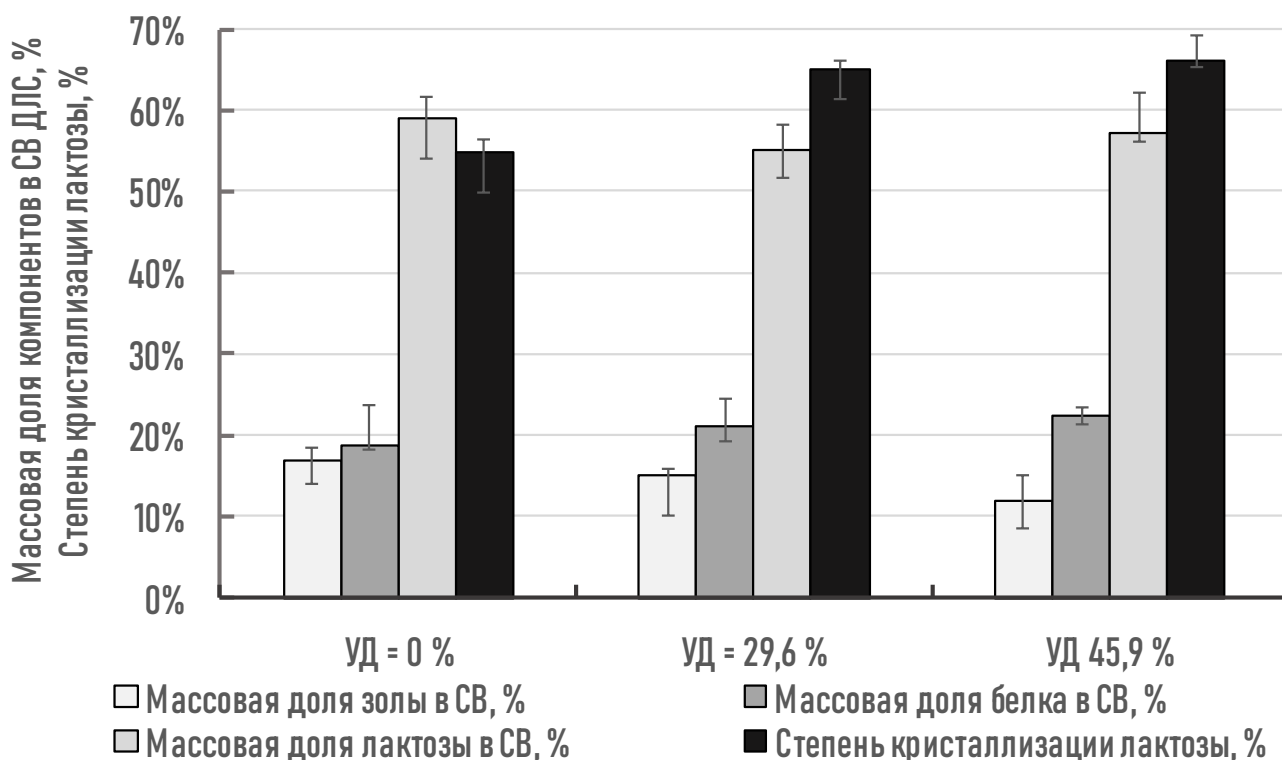


Рисунок 2 – Влияние уровня деминерализации (УД) концентрированной подсырной сыворотки на компонентный состав и степень кристаллизации лактозы

Повышение УД до $(29,56 \pm 0,35)$ % в образце, сконцентрированном без ДФ, способствовало увеличению степени кристаллизации на 15,0 %, вероятно, за счет частичного удаления моновалентных ионов-мелассообразователей. При $K_{dw} = 40,0$ % и УД $(45,91 \pm 0,15)$ %, степень кристаллизации увеличивалась только на 17,0 %, при незначительном повышении массовой доли белка в делактозированной фракции.

Микроскопирование образцов показало преобладание кристаллов лактозы размером (150 – 300) мкм с характерной призматической формой, коэффициенты однородности кристаллов также имели близкие значения: $(0,67 \pm 0,12)$ и $(0,72 \pm 0,9)$ соответственно. Таким образом, использование диафильтрации при НФ концентрировании не представляется целесообразным.

Изучение влияния промывки кристаллов лактозы на компонентный состав делактозированной сыворотки было обосновано необходимостью оптимизации перехода белковой составляющей сырья в делактозированную фракцию для повышения содержания белка в её сухом остатке.

Результаты исследований, показали, что из-за различной растворимости компонентов сырья (белок, лактоза, минеральные вещества) увеличение расхода промывной воды не приводит к пропорциональному изменению их содержания. Например, при коэффициенте промывной воды (K_{ww}), определяемом как доля подготовленной воды от массы промываемых кристаллов, равном 50,0 %, массовая доля белка возрастала на 20,0 % выше контроля, а при $K_{ww} = 100\%$ лишь на 14,0 %. Таким образом, можно ожидать, что после достижения предела извлечения белка дальнейшее увеличение количества промывной воды будет лишь снижать долю белка в сухом остатке за счёт роста концентрации лактозы.

Для проверки данной гипотезы и определения оптимальных условий промывки, при которых массовая доля белка в делактозированной сыворотке будет максимальной, был реализован полный двухфакторный эксперимент (таблица 2), в котором в качестве дополнительного фактора принята также температура промывной воды.

Таблица 2 – Пределы варьирования независимых факторов

Пределы варьирования	Независимые факторы		Выходные параметры	
	X_1 температура воды на промывку, °C	X_2 коэффициент воды на промывку, %	Y_1 массовая доля общего белка в СВ делактозированной сыворотки	Y_2 массовая доля СВ делактозированной сыворотки
Верхний «+1»	50,0	120,0		
Нижний «-1»	10,0	20,0		
Центр «0»	30,0	70,0		
Шаг «λ»	20,0	50,0		

На основе анализа статистической значимости коэффициентов были выведены уравнения регрессии, описывающие зависимость выходных параметров, Y_1 , (уравнение 1) и Y_2 , (уравнение 2) от варьируемых факторов.

$$Y_1 = 13,78 + 0,6517 \cdot X_1 + 0,127 \cdot X_2 - 0,0125 \cdot X_1^2 - 0,0005 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,008 \cdot X_2^2 \quad (1)$$

$$Y_2 = 44,85 + 0,0117 \cdot X_1 + 0,4182 \cdot X_2 - 0,0022 \cdot X_1^2 - 0,001 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,0016 \cdot X_2^2 \quad (2)$$

Визуализация локального максимума (рисунок 3 и 4) позволила выделить области оптимума, в которых положительное влияние линейных членов уравнения компенсируется отрицательным вкладом квадратичных членов и члена взаимодействия.

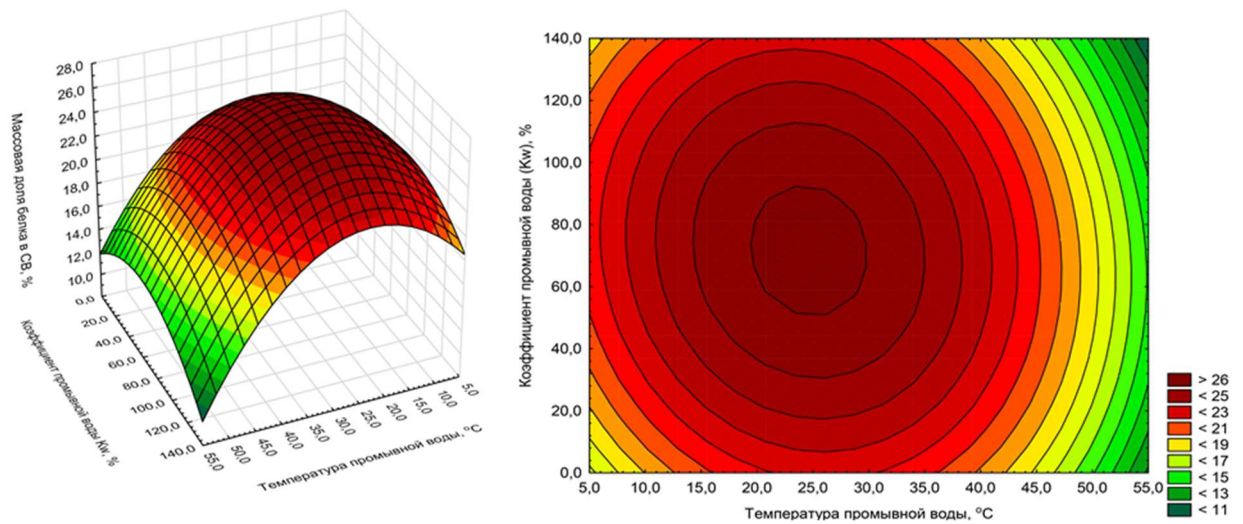


Рисунок 3 – Зависимость массовой доли белка в сухом остатке делактозированной сыворотки от температуры и количества промывной воды

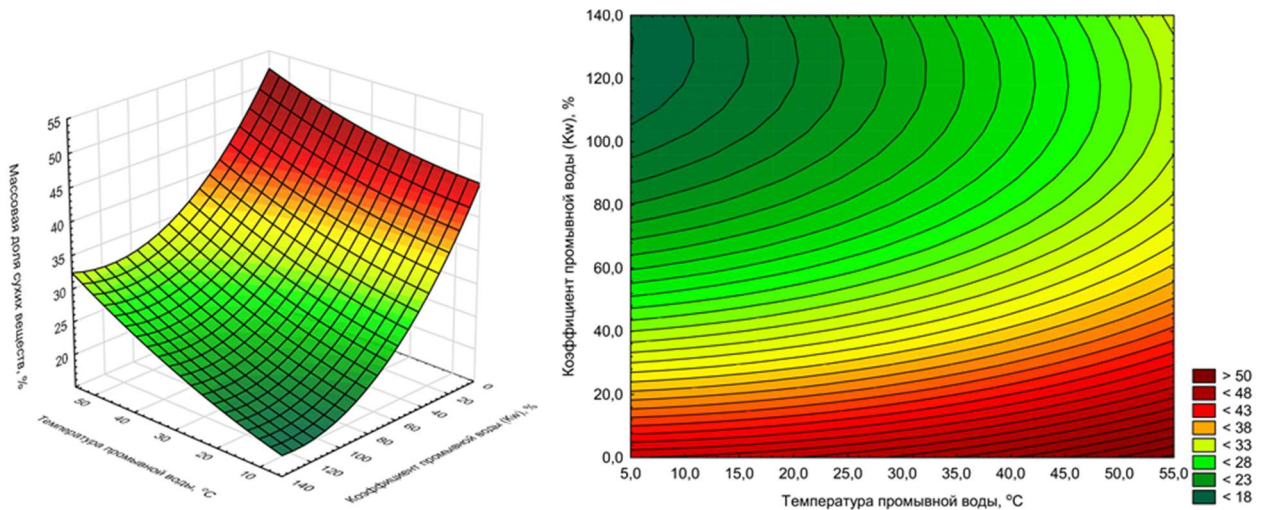


Рисунок 4 – Зависимость массовой доли сухих веществ делактозированной сыворотки от температуры и количества промывной воды

Для Y_1 , массовая доля общего белка в СВ делактозированной сыворотки, (рисунок 3) при использовании промывной воды в количестве (50,0 – 90,0) % от массы влажных кристаллов с температурой (20,0 – 30,0) °С, удастся достичь массовой доли белка в сухом остатке делактозированной сыворотки на уровне более 26,0 %, что увеличивает содержание общего белка в сухом веществе более чем в 2,5 раза по сравнению с исходным сырьем.

Для Y_2 , массовая доля СВ (рисунок 4) делактозированной фракции ожидаемо снижается при смещении условий промывки в область повышенных значений K_{ww} и температуры промывки. Так, при $K_{ww} = 90,0$ % и температуре промывной

воды 30,0 °С, составляет порядка (23,0 – 24,0) %. Поскольку следующими технологическими этапами рассматривались процессы деминерализации и ферментативного расщепления лактозы, то использование пониженных концентраций представлялось более вероятным, соответственно, именно верхние пределы параметров X_1 и X_2 , предпочтительны.

Далее в рамках выполнения работы проводилось сравнение снижения массовой доли минеральных веществ делактозированной сыворотки методом электродиализной обработки и мембранной ёмкостной деионизации (МЕДИ).

МЕДИ предполагает процесс удаления ионов из водных растворов под действием электрического поля. Сырьё проходит между пористыми углеродными электродами с ионообменными мембранами. Анионообменная мембрана блокирует катионы, а катионообменная – анионы, что обеспечивает разделение ионов и высокую степень деминерализации. Согласно литературным данным метод показывает высокую эффективность при деминерализации водных сред.

Однако при обработке сложной многокомпонентной системы, которой является делактозированной сыворотка (таблица 3), максимальная степень деминерализации составила менее 15,0 % в процессе без раскисления и 36,0 % - с раскислением.

Таблица 3 – Физико-химические свойства делактозированной сыворотки, деминерализованной методом ёмкостной деионизации

Показатели	Делактозированная сыворотка		
	до МЕДИ	МЕДИ без раскисления	МЕДИ с раскислением
Электропроводность, мСм/см	9,50 ± 0,12	7,30 ± 0,09	6,35 ± 0,18
Активная кислотность	5,85 ± 0,21	5,73 ± 0,18	6,3 ± 0,22
Массовая доля СВ, %	17,5 ± 0,12	16,6 ± 0,12	15,4 ± 0,12
Массовая доля золы в СВ, %	12,3 ± 0,25	10,5 ± 0,19	7,5 ± 0,13
Уровень деминерализации, %	0	15,12 ± 1,32	35,90 ± 2,41

При pH сырья 5,8 – 6,3 эти комплексы слабо диссоциируют и обладают низкой электрофоретической подвижностью. При этом уровень удаления одно- и двухвалентных ионов был близок.

Проведенные исследования процесса деминерализации делактозированной сыворотки методом классического электродиализа выявили характерную для вторичного молочного сырья двухстадийную кинетику снижения уровня зольности (рисунок 5).

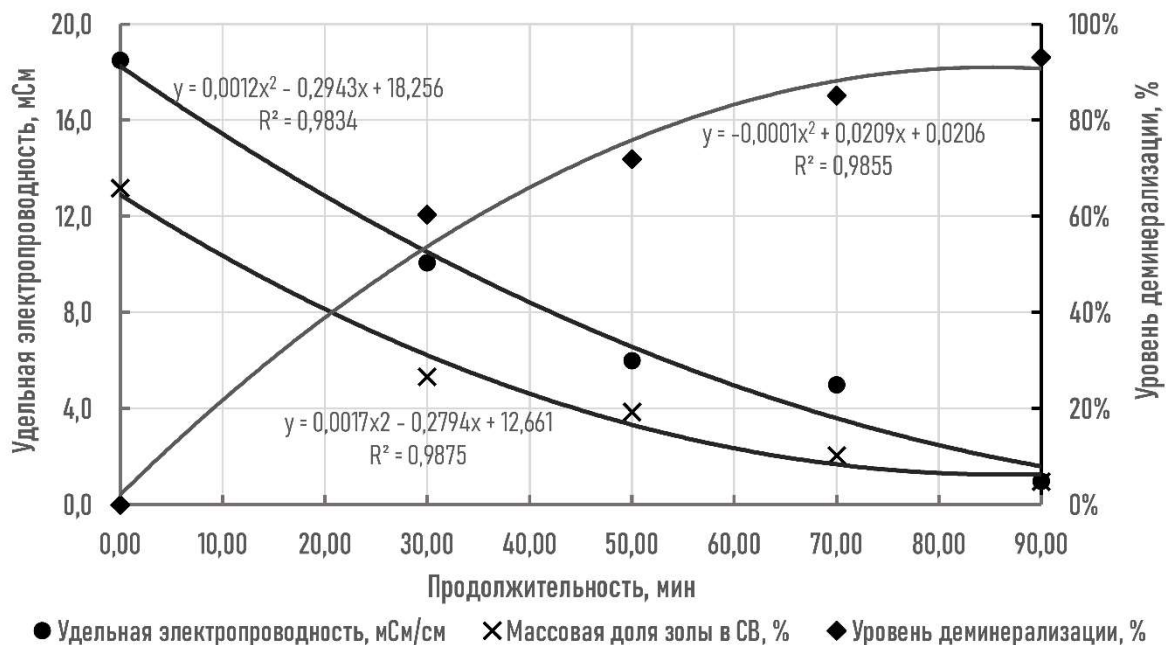


Рисунок 5 – Динамика процесса деминерализации делактозированной подсырной сыворотки

Начальная стадия процесса отличается высокой скоростью, что позволяет достичь уровня деминерализации, порядка 70 %, за счёт удаления большинства одновалентных ионов, затем скорость деминерализации снижается (рисунок 5). Несмотря на это замедление, метод электродиализа демонстрирует принципиальную возможность достижения высоких степеней очистки – более 90 % удаления золы. Переход к этой стадии связан с необходимостью удаления ионов, связанных с органическими компонентами матрицы сырья, а также преодоления влияния концентрационной поляризации и потенциала Доннана на поверхности ионообменных мембран.

Остановка процесса на уровне УД 70 % позволяет снизить минеральную нагрузку при умеренных удельных энергозатратах и получить продукт с удовлетворительными органолептическими характеристиками. УД менее 70 % приводил к получению продукта с низкими органолептическими показателями.

В четвертой главе проведено исследование процесса снижения содержания лактозы в делактозированной сыворотке методом ферментативного гидролиза.

Систематический анализ факторов, определяющих каталитическую активность промышленных β -галактозидаз *K. lactis*, показал, что их эффективность лимитирована рН, температурой и ионным составом среды.

Концентрация субстрата – лактозы определяет баланс между гидролитической и трансгликозилирующей активностью. Причем, проведение гидролиза в нативном молочном сырье накладывает существенные технологические ограничения, сужая допустимый диапазон варьирования параметров процесса. В связи с этим особенно важным является выбор ферментного препарата, изначально адаптированного к специфическим условиям целевого субстрата.

В результате анализа коммерческих препаратов для исследований были выбраны два высокоочищенных жидких концентрата β -галактозидазы, продуцируемых дрожжами *K. lactis*: Biolactase L20 (Kerry Bio-Science, Франция) и Mayalact L 5000 (MAYASAN A.S., Турция).

Сравнительный анализ активности ферментных препаратов Biolactase L20 и Mayalact L 5000 проводился в условиях «холодного» гидролиза ($10,0 \pm 2,0$) °С в делактозированной сыворотке с различным уровнем СВ. Результаты показали существенное преимущество препарата Biolactase L20. При одинаковой дозировке (1,2 мл/л) и продолжительности процесса 24 часа, он обеспечил степень гидролиза ($85,2 \pm 1,6$) %, тогда как для образца Mayalact L 5000 – ($70,2 \pm 2,5$) %. При этом гидролиз проходил при рН (5,8 – 6,0), что ниже оптимального диапазона для обоих ферментов, демонстрируя их устойчивую активность в слабокислой среде без дополнительной корректировки.

С учётом особенностей состава делактозированной сыворотки была проведена серия экспериментов для определения оптимальной дозы фермента, обеспечивающей степень гидролиза не менее 80 %, а также оценка целесообразности проведения гидролиза на ранней стадии – сразу после отделения кристаллов лактозы до промывки.

Результаты показали выраженную зависимость степени гидролиза от дозировки. Увеличение дозы с 0,9 до 2,4 мл/л приводило к совокупному росту степени гидролиза на (19,0 – 24,0) %. Однако прирост имел нелинейный характер: переход от 1,2 до 2,4 мл/л давал лишь дополнительное увеличение на (7,0 – 11,0) %, что непропорционально двукратному росту концентрации фермента. С учётом высокой стоимости ферментных препаратов, доза 1,2 мл/л была определена как оптимальная, обеспечивающая степень гидролиза выше 80 %.

Отдельно изучено влияние уровня деминерализации делактозированной сыворотки на эффективность гидролиза (рисунок 6).

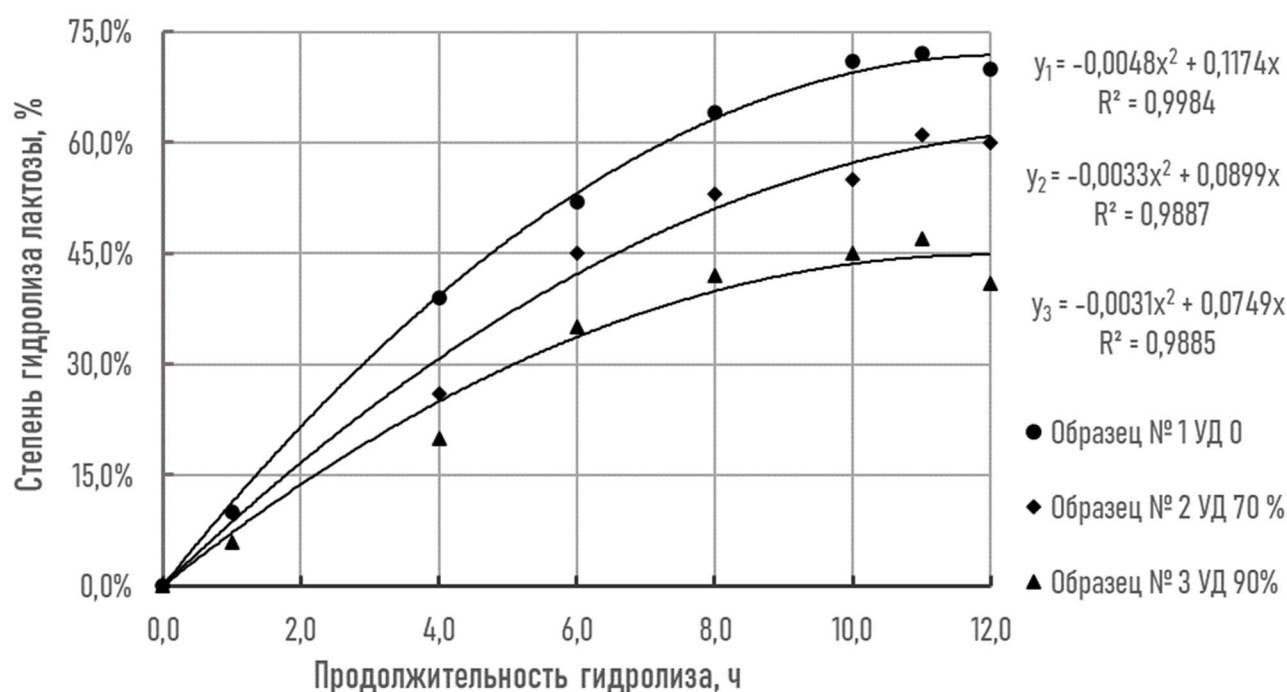


Рисунок 6 – Зависимость степени гидролиза лактозы от уровня деминерализации делактозированной сыворотки, температура: (8,0 – 10,0) °С, дозировка фермента: 1,2 мл/ 1л продукта

Установлено, что начальная скорость гидролиза максимальна в недеминерализованном образце (УД 0 %), что коррелирует с соотношением ионов $[Na^+ + K^+] / [Ca^{2+} + Mg^{2+}] \approx 2,12$.

Глубокая деминерализация, (70,0 – 90,0) %, сопровождающаяся активным удалением одновалентных катионов, снижает начальную скорость реакции.

Таким образом, для эффективного и экономичного производства низколактозной сыворотки рекомендуется проводить гидролиз недеминерализованной делактозированной сыворотки с использованием препарата Biolactase L20, или аналогов с активностью 20 000 GU/мл в дозе 1,2 мл/л. Применение более высоких доз или проведение процесса после глубокой деминерализации технологически менее эффективно и экономически неоправданно.

Гидролиз лактозы в сыворотке до моносахаров комплексно меняет её свойства: повышает сладость и гигроскопичность, снижает склонность к кристаллизации. Эти изменения влияют на реологию, процесс сушки и стабильность конечного порошка. Поэтому в рамках исследований было изучено влияние компонентного состава (лактоза/глюкоза, белка в сухом остатке) на реологические свойства модельных концентрированных систем и эффективность их распылительной сушки (рисунок 7).

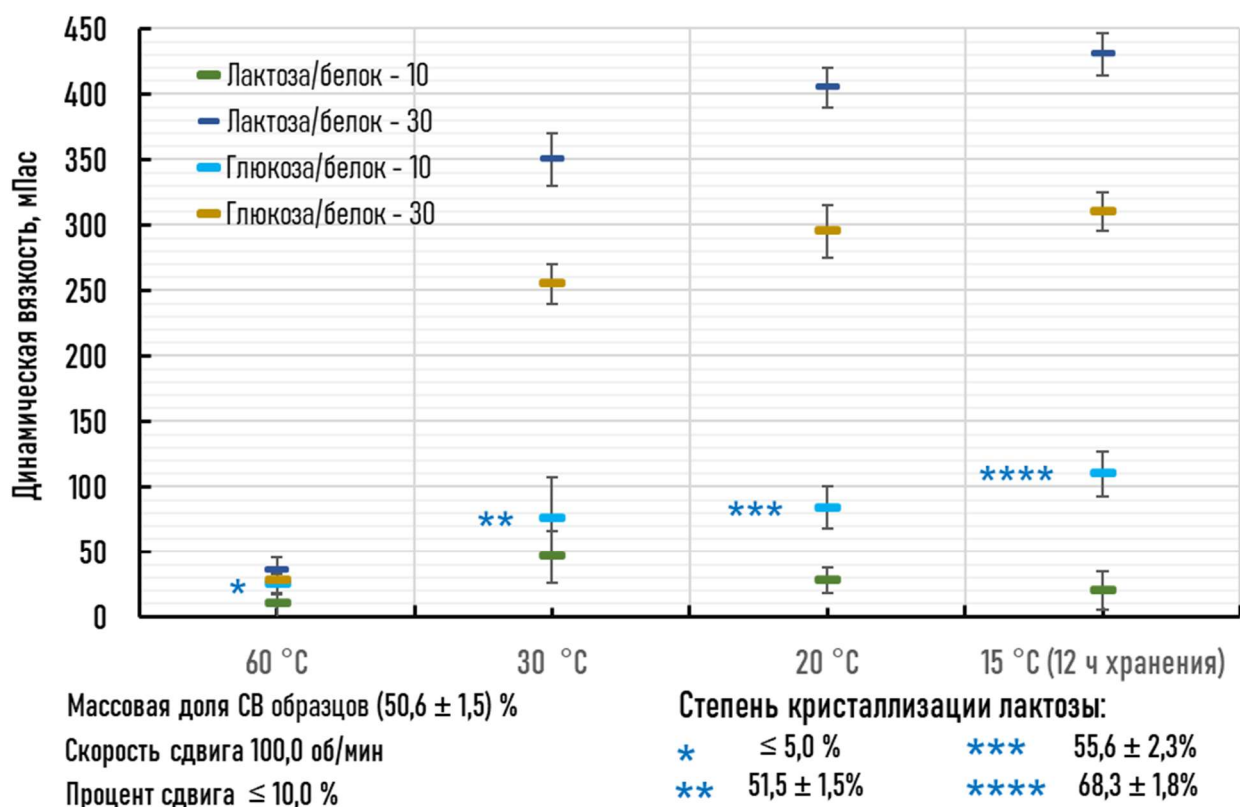


Рисунок 7 – Влияние компонентного состава и температуры на динамическую вязкость белково-углеводных модельных систем.

Реологические исследования модельных систем показали, что повышение доли белка с 10,0 % до 30,0 % является доминирующим фактором, резко увеличивающим вязкость, особенно в системах с лактозой.

Охлаждение вызывало рост вязкости для всех образцов. Однако поведение систем при дальнейшем переохлаждении и хранении определялось типом углеводов и соотношением белок/углевод в целом. Система с 10,0 % белка и лактозой демонстрировала пик вязкости при 30,0 °С с последующим резким падением из-за кристаллизации лактозы при 15,0 °С, в то время как системы с глюкозой и высоким содержанием белка сохраняли стабильно высокую вязкость.

Следовательно, реологическое поведение определяется конкуренцией между увеличением вязкости при охлаждении и её снижением из-за фазового перехода (кристаллизации) лактозы. При этом высокое содержание белка (30,0 %) выступает основным фактором, стабилизирующим систему.

Изучение процесса распылительной сушки модельных систем подтвердило стабилизирующую роль белка: увеличение его доли с 10,0 % до 30,0 % статистически значимо повышало выход сухого продукта для системы моносахаров с $(15,0 \pm 2,0)$ % до $(85,0 \pm 3,0)$ %. В системе лактоза-белок увеличение выхода до $(92,0 \pm 1,0)$ % наблюдалось, вероятнее всего, за счет увеличения средней температуры стеклования композиции. Опыты с образцами делактозированной сыворотки, выработанными в лабораторных условиях, подтвердили технологическую осуществимость сушки с высоким выходом (93,6 % и 92,6 %) для делактозированной и низколактозной сыворотки соответственно. Однако сухая низколактозная сыворотка проявляла значительно более высокую гигроскопичность и выраженную склонность к слеживанию при хранении, что требует обязательного применения барьерных упаковочных материалов.

Таким образом, повышенное содержание белка определяет стабильность низколактозных концентратов с регулируемыми реологическими свойствами и высокой технологичностью при сушке, несмотря на гигроскопичность сухого продукта, которая характерна для систем с гидролизованной лактозой.

В пятой главе представлена технология сухой низколактозной сыворотки с учётом требования НАССР.

Разработанная технология направлена на обеспечение максимального сохранения нативных белков за счет ряда мер: использование подсырной сыворотки, мягкой тепловой обработки, сгущения на пленочных выпарных установках и промывки кристаллов с рециклом промывных вод. Последующий электродиализ позволяет регулировать минеральный состав и обеспечивает содержание белка в сухом остатке готового продукта не менее 30,0 %.

Технология предусматривает производство двух видов сухой сыворотки с пониженным содержанием лактозы: делактозированной (с использованием только кристаллизации лактозы) и низколактозной (с использованием кристаллизации лактозы и ферментативного гидролиза (рисунок 8).

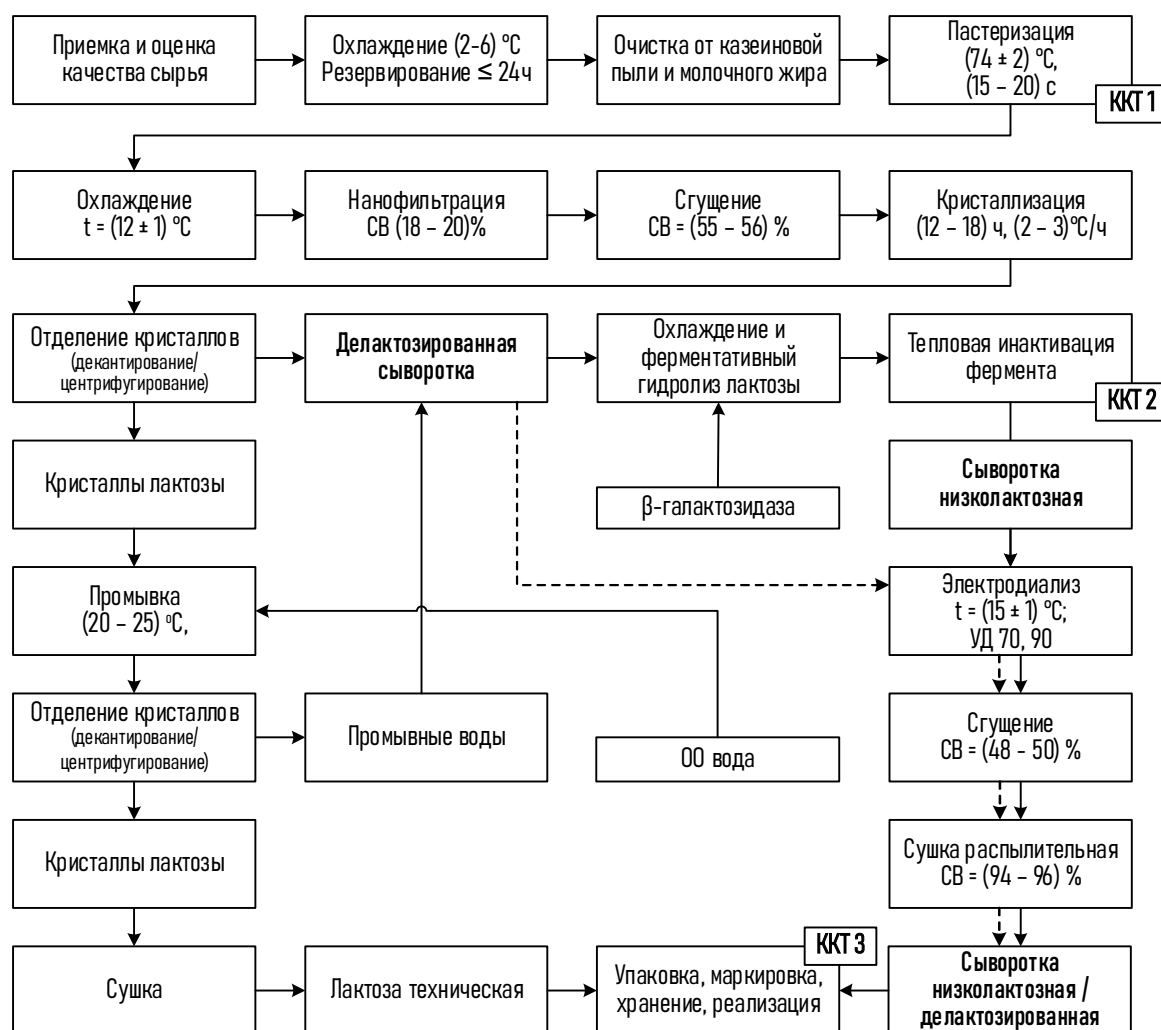


Рисунок 8 – Технологическая схема получения сухой низколактозной/делактозированной сыворотки

Технологический процесс включает приемку сырья, тепловую и механическую обработку, НФ концентрирование. Полученный НФ ретентат с СВ (18,0 – 20,0) % сгущают до (55,0 – 60,0) % СВ, проводят кристаллизацию и отделение кристаллов лактозы с последующей промывкой, формируя делактозированную сыворотку с СВ (20,0 – 23,0) % СВ.

Для получения низколактозного продукта делактозированную сыворотку охлаждают до (6,0 – 10,0) °С, проводят ферментативный гидролиз (степень >80 %) и инактивацию фермента. При необходимости продукт деминерализуют методом электродиализа, сгущают до (48,0 – 50,0) % СВ и высушивают в двухступенчатой распылительной сушилке. Готовый сухой продукт фасуют и хранят при температуре $\leq 20,0$ °С и влажности $\leq 80,0$ %.

Исследования хранимоспособности сухих продуктов в течение 18 месяцев при рекомендуемых условиях показали, что органолептические и физико-химические показатели остаются стабильными в течение 12 месяцев. К 18 месяцу отмечалось увеличение влажности до (5,28 – 6,10) %, а также рост общей микробной обсеменённости (КМАФАнМ) до $(5,6 - 5,9) \cdot 10^4$ КОЕ/г. БГКП, патогенная микрофлора не обнаруживались, количество дрожжей и плесеней оставалось в пределах нормы. На основании комплексной оценки принят срок годности 12 месяцев.

Для обеспечения безопасности производства в соответствии с принципами НАССР были определены критические контрольные точки: пастеризация сыворотки и тепловая деактивация фермента. Также установлен ряд контрольных точек качества на этапах приемки сырья, нанофльтрации, сгущения, кристаллизации, электродиализа и сушки с мониторингом органолептических, физико-химических и микробиологических параметров.

Экономическая оценка подтвердила эффективность технологии производства низколактозной сыворотки. При годовом объёме 9900 т рентабельность составила 43,64 %. Технология апробирована на АО «Молочный комбинат «Ставропольский» и обеспечена нормативной документацией (ТУ и ТИ 10.51.55.150-016-37676459-2025).

Заключение

1. На основании научно-технических и литературных данных обоснован выбор кристаллизации и ферментативного гидролиза в качестве методов направленного снижения содержания лактозы во вторичном молочном сырье, включая подсырную сыворотку.

2. Установлено, что применение диафильтрации при нанофильтрационной обработке подсырной сыворотки повышает степень удаления минеральных веществ с $(29,56 \pm 0,35) \%$ до $(46,0 \pm 3,5) \%$, но не оказывает значительного влияния на эффективность кристаллизации лактозы: степень кристаллизации значительно не увеличивается и составляет $(65,0 - 67,0) \%$, морфология и средний размер кристаллов не изменяются.

3. Показано, что изменения компонентного состава делактозированной сыворотки при использовании промывки кристаллов лактозы лимитируются растворимостью лактозы: повышение объема промывной воды интенсифицирует переход углевода в раствор, снижая массовую долю белка в сухом остатке.

4. На основании полного двухфакторного эксперимента определены оптимальные условия промывки кристаллов лактозы: температура $(20,0 - 30,0) ^\circ\text{C}$, количество промывной воды $(50 - 90) \%$ от массы сырья, которые позволяют повысить содержание белка в сухом остатке делактозированной сыворотки до $26,0 \%$, что в 2,5 раза превышает значение параметра в исходном сырье.

5. Установлено, что удаление одно- и двухвалентных ионов в процессе мембранной емкостной деионизации делактозированной сыворотки протекает более равномерно, чем при электродиализной обработке, однако максимальная степень деминерализации $36,0 \%$ не позволяет использовать метод для достижения глубоких степеней деминерализации.

6. Подтверждено, что процесс электродиализа делактозированной сыворотки обеспечивает уровень деминерализации более $90,0 \%$ при повышении массовой доле белка в сухом остатке более $28,0 \%$; процесс характеризуется двухстадийной кинетикой с выраженным снижением скорости на завершающей стадии.

7. Установлено, что ионный состав делактозированной сыворотки оказывает определяющее влияние на каталитическую активность β -галактозидазы. Наибольшая скорость гидролиза достигается при естественном для сырья соотношении одновалентных и двухвалентных катионов ($[\text{Na}^+ + \text{K}^+]/[\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}] \approx 2,12$). Глубокая деминерализация, смещающая баланс в сторону двухвалентных ионов, приводит к снижению ферментативной активности на (20,0 – 25,0) % относительно недеминерализованного сырья.

8. Подтверждено, что использование препарата β -галактозидазы K. Lactis с активностью не менее 20000 GU/мл при гидролизе лактозы в делактозированной недеминерализованной сыворотке с массовой долей сухих веществ ($23,83 \pm 0,71$) в дозе 1,2 мл/л обеспечивает степень гидролиза лактозы более 80 % за 24,0 ч при температуре (8 – 10) °С, что является технологически целесообразным решением.

9. Установлено, что повышение массовой доли белка в сухом остатке делактозированной и низколактозной сыворотки до 28,0 % исключает необходимость этапа кристаллизации лактозы перед сушкой и при массовой доле сухих веществ (48,0 – 50,0) % обеспечивает вязкость сырья до 100 мПа·с при температуре подачи сырья на распылительную сушку (40,0 – 45,0) °С.

10. Разработана технология сыворотки молочной низколактозной деминерализованной сухой с учетом требований НАССР, позволяющая вырабатывать линейку сухих продуктов с разным уровнем деминерализации и степенью делактозирования. На разработанную технологию утверждена техническая документация (ТУ, ТИ 10.51.55.150-016-37676459-2025), проведены опытно-промышленные выработки. Оценка экономической эффективности показала рентабельность и окупаемость разработанной технологии.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России:

1. Володин, Д. Н. Эффективность деминерализации молочной сыворотки: анализ методов и оптимизация их использования / Д. Н. Володин, В. К. Топалов, И. К. Куликова, И. А. Евдокимов, Д. С. Хазов, К. Ю. Сорокин // Молочная промышленность. – 2024. – №4. – С. 50 – 55.

2. Евдокимов, И. А. Сравнительное исследование состава затравочных материалов, кристаллизации лактозы / И. А. Евдокимов, И. К. Куликова, А. С. Гридин, Д. С. Хазов, Л. А. Гордиенко // Современная наука и инновации. – 2025. – №1. – С. 198 – 201.

3. Володин, Д. Н. Современные направления глубокой переработки молочной сыворотки / Д. Н. Володин, В. К. Топалов, И. К. Куликова, А. А. Семченко, И. А. Евдокимов, Д. С. Хазов // Сыроделие и маслоделие. – 2025. – №2. – С. 4 – 6.

Статьи в журналах и сборниках, индексируемых РИНЦ

4. Шрамко, М. И. Современные тренды и особенности технологии получения низколактозных продуктов и напитков / М. И. Шрамко, И. А. Евдокимов, Д. М. Назаренко, Д. С. Хазов, Р. Ахмедов // Актуальные проблемы прикладной биотехнологии и инженерии // Сборник материалов Международной научно-практической конференции. – Оренбург: ОГУ, 2023. – С. 123 – 127.

5. Родионов, И. С. Исследование влияния технологических факторов на ферментативный гидролиз белков молочной сыворотки / И. С. Родионов, И. А. Евдокимов, Е. А. Абакумова, Е. Э. Чумаков, Д. С. Хазов // Сборник тезисов II международного симпозиума «Пищевые здоровьесберегающие технологии», посвященного 50-летию КемГУ. – Кемерово: КемГУ, 2023. – С. 114 – 117.

6. Евдокимов, И. А. Гибридная технология сыворотки молочной деминерализованной и области её применения / И. А. Евдокимов, Д. Н. Володин, М. С. Золоторёва, И. С. Родионов, Д. С. Хазов, И. А. Золоторев // Молочная река. – 2024. – №2 (94). – С. 22 – 27.

7. Евдокимов, И. А. Современные аспекты производства деминерализованной молочной сыворотки / И. А. Евдокимов, Е. А. Юрова, А. Д. Лодыгин, М. С. Золоторева, Д. С. Хазов // Сборник материалов Международной научно-практической конференции, посвящённой 20-летию Технологического института «Пищевая индустрия: инновационные процессы, продукты и технологии». – Москва: Московская сельскохозяйственная академия, 2024. – С. 199 – 204.

8. Куликова, И. К. Исследование влияния размера частиц на состав и свойства сухого пермеата распылительной сушки / И. К. Куликова, И. А. Евдокимов, А. С. Гридин, К. Ю. Сорокин, Д. С. Хазов // Материалы IX Международной научно-практической конференции «Современные достижения биотехнологии: фундаментальные и прикладные аспекты. Инновационные биотехнологии природных и синтетических биологически активных веществ. Нарочанские чтения-16». – Ставрополь: Изд-во СКФУ, 2024. – С. 198 – 201.

9. Сорокин, К. Ю. Технологические подходы к получению функциональных ингредиентов из вторичного молочного сырья с регулируемым углеводным и минеральным составом / К. Ю. Сорокин, Д. М. Назаренко, Д. С. Хазов, И. С. Родионов, А. Д. Лодыгин, М. И. Шрамко, И. А. Евдокимов // Сборник материалов VII международной научно-практической молодёжной конференции «Поландовские чтения» (5 июня 2025 г.). – Москва: ФГАУ НИИХП, 2025. – С. 245 – 249.

10. Евдокимов, И. А. Исследование вязкости модельных белково-углеводных систем применительно к технологии распылительной сушки лактозосодержащего сырья / И. А. Евдокимов, И. К. Куликова, Л. А. Гордиенко, Д. С. Хазов, А. Ю. Мусиенко // Материалы X Международной научно-практической конференции «Современные достижения биотехнологии: вектор на технологическое лидерство». – Ставрополь: Издательство «Бюро новостей», 2025. – С. 100 – 103.

11. Евдокимов, И. А. Высокотехнологичное производство и комплексная переработка вторичного молочного сырья / И. А. Евдокимов, А. Д. Лодыгин, Д. М. Назаренко, Д. С. Хазов, К. Ю. Сорокин // Сборник «Национальная молочная индустрия России». – М.: РСРМО, 2025. – С. 88 – 92.

12. Хазов, Д. С. Исследование влияния процесса промывки кристаллов лактозы на состав делактозированной сыворотки / Д. С. Хазов, И. А. Евдокимов, Н. Н. Никульникова, К. Ю. Сорокин, Д. М. Назаренко // Сборник тезисов IV международного симпозиума «Пищевые технологии», посвященного 91-летию со дня рождения доктора технических наук, профессора, заслуженного деятеля науки и техники РФ, основателя научной школы Льва Александровича Остроумова. – Кемерово: КемГУ, 2025. – С. 306 – 310.