

На правах рукописи



ГАВРИШ АЛЕКСЕЙ ВИКТОРОВИЧ

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ
НАНОФИЛЬТРАЦИОННОГО ПЕРМЕАТА МОЛОЧНОГО СЫРЬЯ
МЕТОДОМ ОБРАТНОГО ОСМОСА**

Специальность: 4.3.3. Пищевые системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертация 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:

Мамай Дмитрий Сергеевич

кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты:

Богданова Екатерина Викторовна

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

Лазарев Владимир Александрович

кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой биотехнологии и
инжиниринга ФГБОУ ВО «Уральский
государственный экономический университет»

Ведущая организация:

ФГБОУ ВО «Омский государственный
аграрный университет имени П.А. Столыпина»

Защита состоится «08» июня 2026 г. в 15-00 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. 312.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет» по адресу: 355017, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1 и на сайте <https://ncfu.ru/upload/medialibrary/44f/iyqw2ap4waq8slp8ji0hifr1vl2sdx63/Dissertatsiya-Gavrish-A.V.-.pdf>

С авторефератом можно ознакомиться по адресу: <https://ncfu.ru/nauka/dissertatsionnye-sovety/obyavleniya-o-zashchite-dissertatsiy/34915/>

Автореферат разослан «__» _____ 2026 года

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.398.07,
кандидат технических наук, доцент

Д.С. Мамай

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Молочная промышленность относится к числу отраслей с высоким удельным водопотреблением и образованием значительных объемов сточных вод. На каждый литр переработанного молока может приходиться до 10 л воды, используемой на технологические и санитарно-гигиенические нужды, в зависимости от ассортимента выпускаемой продукции. Сточные воды молочных предприятий характеризуются высоким содержанием органических веществ, включая белки, жиры, углеводы и минеральные соли, что делает их одной из наиболее проблемных категорий отходов пищевого производства.

Сокращение объемов сточных вод и их утилизация на предприятиях молочной промышленности являются важными задачами, решение которых требует внедрения ресурсосберегающих технологий. Особую актуальность приобретает рекуперация отдельных фракций сточных вод, которые после соответствующей обработки могут быть возвращены в технологический цикл предприятия.

Мембранные технологии позволяют сократить объемы сточных вод на предприятиях молочной промышленности. После удаления белков и лактозы из молочной сыворотки образуются потоки, относящиеся к категории побочных продуктов молочного производства, которые могут быть переработаны и использованы в различных целях предприятия.

Особый интерес представляет нанопермеат (НФ) пермеат – побочный продукт, формирующийся после отделения белков и лактозы при переработке сыворотки или ультрафильтрационных (УФ) пермеатов. Он характеризуется низкой концентрацией органических и минеральных веществ и может составлять до 70–80 % объема перерабатываемого сырья. Благодаря низкому содержанию сухих веществ НФ пермеат рассматривается как потенциальный источник воды, пригодной для использования в молочном производстве. Одним из мембранных методов, позволяющих эффективно перерабатывать НФ пермеат, является обратный осмос (ОО), обеспечивающий концентрирование остаточных растворенных веществ и получение ОО пермеата высокой степени очистки.

Для ОО ретентата характерно преобладание массовой доли калия над натрием. В связи с этим использование ОО ретентата в рецептурах молочных продуктов, в частности айрана, может способствовать повышению содержания калия, что имеет важное значение в контексте профилактики сердечно-сосудистых заболеваний.

Степень разработанности темы исследования. Научные изыскания в области глубокой переработки вторичного молочного сырья проводят специалисты ФГАОУ ВО СКФУ, ФГБОУ ВО КемГУ, ГБУ ЯО ЯГИКСПП, ФГБОУ ВО ВГУИТ, Юго-Восточного исследовательского центра молочных продуктов (университет штата Северная Каролина), Датского технического университета и пр. Существенный вклад в разработку данной тематики внесли: А. Г. Храмцов, А. Ю. Просеков, И. А. Евдокимов, С. П. Бабенышев, Л. А. Остроумов, К. К. Полянский, А. И. Гнездилова, Г. Б. Гаврилов, Е. И. Мельникова, Ni Cheng, David Barbano, Brandon Carter и др.

Использование баромембранных процессов при переработке молочного сырья является одним из перспективных и активно изучаемых направлений в молочной промышленности. При этом переработка и целенаправленное использование НФ пермеата в научных публикациях освещены фрагментарно. Несмотря на наличие промышленной практики обратноосмотической переработки НФ пермеата, сведения о режимах процесса в открытых источниках представлены ограниченно; не изучено влияние технологических параметров на состав и физико-химические свойства получаемых пермеата и ретентата. Кроме того, отсутствует систематизированное обоснование возможностей практического применения ОО ретентата, полученного из НФ пермеата, в пищевых производствах. Это определяет актуальность и необходимость проведения комплексных исследований в данном направлении.

Цель и задачи исследований. Целью исследований является разработка технологии переработки нанофильтрационного пермеата молочного сырья методом обратного осмоса.

Задачи, решаемые в рамках работы:

- 1) изучить состав и свойства НФ пермеатов молочного сырья;

2) изучить влияние параметров процесса ОО на производительность по пермеату;

3) изучить состав и свойства продуктов обратноосмотической переработки НФ пермеата – ОО пермеата (воды для производственных нужд) и ОО ретентата, содержащего минеральные вещества молока;

4) оценить коррозионную активность ОО пермеата в отношении пищевой нержавеющей стали при хранении;

5) исследовать микробиологические показатели ОО пермеата при моделировании производственных условий хранения;

6) разработать рецептуру и технологию айрана с добавлением ОО ретентата в качестве солезаменителя;

7) рассчитать экономический эффект от внедрения разработанной технологии переработки НФ пермеата.

Научная новизна работы. Установлены закономерности изменения содержания сухих веществ, удельной электропроводности (УЭП), рН и титруемой кислотности ОО пермеата в зависимости от давления при обратноосмотической переработке НФ пермеата, а также от содержания сухих веществ в ОО ретентате. Проведена оценка микробиологической стабильности ОО пермеата в условиях, моделирующих промышленное хранение, установлены допустимые сроки хранения ОО пермеата.

Определен минеральный состав ОО ретентата, полученного при переработке НФ пермеата. Обоснована возможность использования ОО ретентата в рецептуре айрана для снижения массовой доли натрия.

Установлено, что снижение селективности НФ мембран в процессе длительной эксплуатации (около 700 производственных циклов) приводит к увеличению содержания лактозы в сухом веществе НФ пермеата на 35 % по сравнению с пермеатом, полученным на новых мембранах (до 100 производственных циклов). При этом эксплуатация НФ мембран не оказывала существенного влияния на концентрацию кальция и магния в НФ пермеате (не более $6,6 \pm 4,1$ мг/кг и $1,9 \pm 1,2$ мг/кг соответственно; около 700 производственных циклов).

Теоретическая и практическая значимость работы. Расширены научные представления о составе и свойствах пермеата, полученного в процессе нанофильтрации смеси УФ пермеатов подсырной и творожной сыворотки, обезжиренного молока. Установленные закономерности позволяют прогнозировать изменения удельной электропроводности ОО пермеата в зависимости от давления и содержания сухих веществ в ОО ретентате при обратноосмотической переработке НФ пермеата, что может быть использовано при промышленной реализации процесса для оперативного контроля качества ОО пермеата на выходе из мембранного элемента.

Практическая значимость результатов работы заключается в разработке технологии переработки НФ пермеата методом обратного осмоса для получения ОО пермеата, пригодного для использования в технологических процессах, а также в разработке технологии производства айрана с 50%-ной заменой поваренной соли ОО ретентатом, обеспечивающей снижение содержания натрия в продукте без изменения традиционного вкуса и возникновения пороков продукта. Разработки защищены патентом.

Разработана техническая документация на айран с добавлением ОО ретентата, содержащего минеральные вещества молока ТУ 10.51.52–130–00437062–2025 «Айран с добавлением минеральных веществ молока», а также на ОО ретентат ТУ 10.51.56–129–00437062–2025 «Продукт переработки молока безбелковый. Обратноосмотический ретентат».

Разработанная технология прошла успешную апробацию в промышленных условиях на АО «Молочный комбинат «Ставропольский». Проведены производственные выработки ОО пермеата в соответствии с технологическим регламентом предприятия ТР 10.51.56.490–014–02067965–2024, а также опытно-производственная выработка айрана с добавлением ОО ретентата.

Методология и методы исследований. Промышленный процесс переработки НФ пермеата моделировали на пилотной ОО установке. Выбор методов анализа осуществлялся с учетом рекомендаций и указаний нормативных документов, действующих в РФ, за исключением случаев, требующих нестандартных методов

исследования. Исследование состава НФ пермеатов, ОО ретентатов и пермеатов, образцов айрана проводили при помощи следующих инструментальных методов анализа: высокоэффективная жидкостная хроматография (ВЭЖХ) (содержание углеводов), энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия (содержание минеральных элементов); общий азот определяли по Кьельдалю (содержание общего азота).

Нормальность распределения значений, полученных в нескольких повторностях измерения, проверяли по критерию Шапиро-Уилка. Для определения статистической значимости различий между двумя группами значений использовали двухвыборочный t-критерий Стьюдента для независимых выборок. Статистическую значимость различий между несколькими группами значений определяли посредством дисперсионного анализа с апостериорным тестом Тьюки (Tukey HSD test), уровень значимости $p < 0,05$, если не указано иное.

Положения, выносимые на защиту:

- состав и свойства НФ пермеата молочного сырья;
- зависимость потока через мембрану и свойств ОО пермеата от давления при переработке НФ пермеата обратным осмосом;
- микробиологические показатели ОО пермеата, полученного из НФ пермеата молочного сырья, в условиях моделируемого хранения;
- рецептура и технология производства айрана с использованием ОО ретентата в качестве солезаменителя.

Степень достоверности результатов. Полученные результаты основаны на экспериментальных данных, собранных с использованием высокоточных методов физико-химического анализа. Для подтверждения воспроизводимости проведенных измерений приведены описательные статистические показатели, отражающие степень вариативности данных в исследуемых выборках.

Апробация результатов. Основные результаты научной деятельности были представлены и обсуждены на международных и всероссийских научно-практических конференциях: XXII Международная научно-практическая конференция «Современные проблемы техники и технологии пищевых

производств», г. Барнаул, 2022 г.; X и XI ежегодные научно-практические конференции Северо-Кавказского федерального университета «Биоразнообразие, биоресурсы, вопросы биотехнологии и здоровье населения Северо-Кавказского региона», г. Ставрополь, 2023–2024 гг.; XVI Международная научная конференция «Мембраны–2025», г. Минск, Республика Беларусь, 2025 г.; а также на национальной с международным участием научно-практической конференции «Инновационные направления развития в образовании, экономике, технике и технологиях», г. Ставрополь, 2025 г.

Основные результаты прошли практическую апробацию в рамках реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства по теме: «Создание первого в России высокотехнологичного производства пребиотика лактулозы и функциональных молочных ингредиентов для импортозамещения в медицине, ветеринарии, детском питании, производстве лечебно-профилактических продуктов для людей и животных», выполняемого АО «Молочный комбинат «Ставропольский» и СКФУ при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (договор № 075-11-2022-021 от 07.04.2022 г.).

Результаты диссертационной работы отражены в 7 публикациях, из них 2 в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России, получен 1 патент РФ на изобретение.

Структура и объем диссертации. Текст диссертации включает в себя введение, пять глав, заключение, список литературы, содержащий 167 источников, девять приложений. Работа изложена на 142 страницах машинописного текста, включает 33 рисунка и 40 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлена актуальность и цель выбранного направления исследований. Обоснована теоретическая и практическая значимость работы. Изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрены современные подходы к переработке побочных потоков молокоперерабатывающих предприятий с использованием мембранных технологий – УФ, НФ, а также ОО. Показано, что НФ пермеат может использоваться в качестве исходного сырья для ОО переработки. При этом образуется ОО пермеат, пригодный для повторного использования в производственных целях, включая промывку оборудования, восстановление сухих ингредиентов, диафильтрацию, а также ОО ретентат, содержащий минеральные вещества молока. Обоснована целесообразность применения ОО ретентата в качестве солезаменителя в рецептуре кисломолочных продуктов, в частности айрана.

Во второй главе представлены общая схема проведения научных исследований (рисунок 1) и перечень основного лабораторного оборудования.

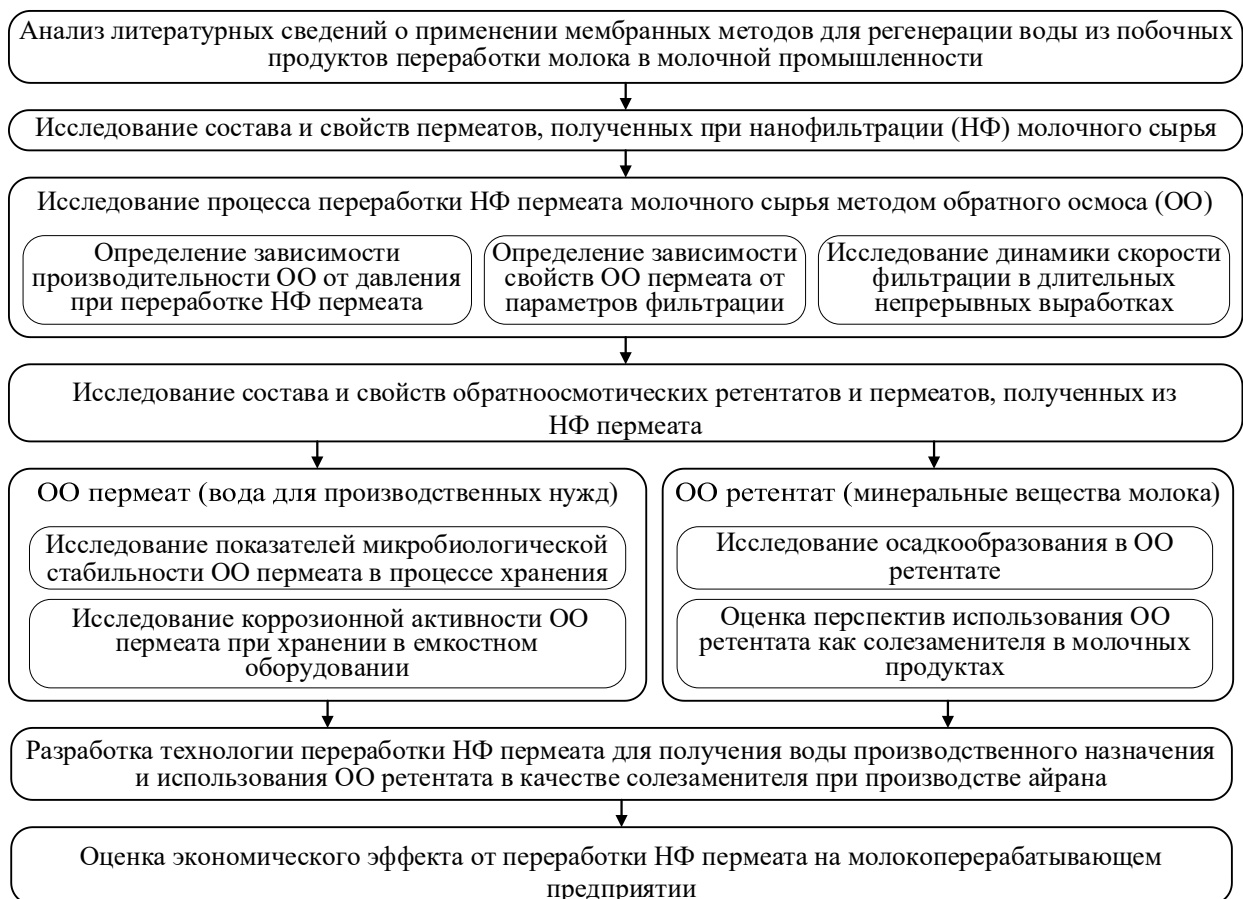


Рисунок – 1. Общая схема выполнения диссертационной работы

Исследования проводили на установке мембранной фильтрации TestUnit M20 (Alfa Laval, Швеция) с мембранным корпусом для спирального полимерного элемента. Фильтрацию осуществляли через санитарную ОО мембрану

RO98pHt-2517/48 (Alfa Laval, Швеция). ОО переработку НФ пермеата осуществляли при скорости циркуляции 28 л/мин и давлении 0,8–5,5 МПа. Температура фильтрации составляла 17 ± 2 °С.

В третьей главе представлены результаты исследования параметров переработки НФ пермеатов методом обратного осмоса. Основной акцент сделан на оценке эффективности процесса при различных условиях.

В работе рассмотрены состав и свойства НФ пермеатов, получаемых в промышленных условиях и используемых в качестве сырья для получения воды, пригодной для молочного производства. Показано, что вариабельность состава НФ пермеата обусловлена формированием его из УФ пермеатов различного происхождения (подсырной и творожной сывороток, обезжиренного молока, в том числе пермеатов после диафильтрации). Для оценки реальной вариабельности исследованы НФ пермеаты, полученные на мембранах с различным сроком эксплуатации: менее 3 месяцев (новые мембраны, до 100 производственных циклов) и более 2 лет эксплуатации (изношенные мембраны, с наработкой около 700 производственных циклов).

Нанофильтрацию проводили с использованием промышленных мембран SNNF 8038-31 (АО «РМ Нанотех», Россия) и SS-NF2-8038-F (Rising Sun, Китай) с сопоставимыми паспортными характеристиками. Такой подход позволил оценить вариабельность состава НФ пермеата, получаемого в реальных условиях молочного производства. Результаты анализа проб НФ пермеатов представлены в таблице 1.

Анализ данных таблицы показывает, что степень износа мембран существенно влияет на состав НФ пермеатов. При эксплуатации изношенных мембран концентрация лактозы в сухом веществе пермеата увеличивается на 35 % по сравнению с новыми мембранными элементами.

НФ пермеаты, полученные с использованием новых мембран различных производителей, характеризуются сопоставимыми значениями рН, СВ и УЭП. При этом при применении мембран «Rising Sun» содержание лактозы в сухом веществе пермеата было в 2,5 раза ниже по сравнению с мембранами «РМ Нанотех». Это может

быть связано с различиями характеристик мембранного полотна и, как следствие, селективности мембранных элементов.

Таблица 1 – Состав и свойства НФ пермеатов (результаты анализа проб 10 промышленных выработок).

	Мембраны «РМ Нанотех» (до 100 произв. циклов)	Мембраны «Rising Sun» (до 100 произв. циклов)	Мембраны «РМ Нанотех» (около 700 произв. циклов)
СВ, г/100 г	0,43 ± 0,10	0,30 ± 0,06	0,32 ± 0,10
рН	5,98 ± 0,42	6,28 ± 0,23	6,22 ± 0,19
УЭП, мСм/см	3,84 ± 0,77	4,17 ± 0,69	3,22 ± 0,66
Зола, г/100 г	0,20 ± 0,05	0,21 ± 0,04	0,13 ± 0,04
Натрий, мг/кг	200 ± 42	225 ± 38	144 ± 61
Калий, мг/кг	597 ± 186	768 ± 231	350 ± 108
Магний, мг/кг	0,8 (0–3,5)	0,5 (0–5)	1,9 ± 1,2
Кальций, мг/кг	Не обнаружен	Не обнаружен	6,6 ± 4,1
Хлорид, мг/кг	655 ± 230	857 ± 273	406 ± 123
Фосфат, мг/кг	199 ± 77	163 ± 47	126 ± 34
Общий азот, мг/кг	128 ± 18	110 ± 23	78 ± 19
Лактоза, мг/л	1187 ± 704	329 ± 117	2028 ± 573
Галактоза, мг/л	258 ± 95	45 ± 17	86 (0–414)
Глюкоза, мг/л	64 (23–167)	25 ± 11	57 (0–557)

Для получения детальной информации о влиянии давления на производительность при обратноосмотической переработке НФ пермеата были проведены выработки при давлении в диапазоне от 0,8 до 5,5 МПа.

На рисунке 2 приводится зависимость скорости потока через мембрану при обратном осмосе НФ пермеата, полученного фильтрацией через новые и изношенные НФ мембранные элементы. Перед измерением НФ пермеат концентрировали до 1, 2 и 3 % СВ по рефрактометру.

Установлено, что при обратном осмосе НФ пермеата, независимо от фактора концентрирования (ФК) и состояния мембранных элементов, скорость потока через мембрану изменяется линейно. Отсутствие критического потока и, следовательно, отсутствие признаков мембранного загрязнения в исследованных режимах

подтверждает устойчивость и предсказуемость работы системы в рамках исследуемых параметров, а также ее пригодность к масштабированию.

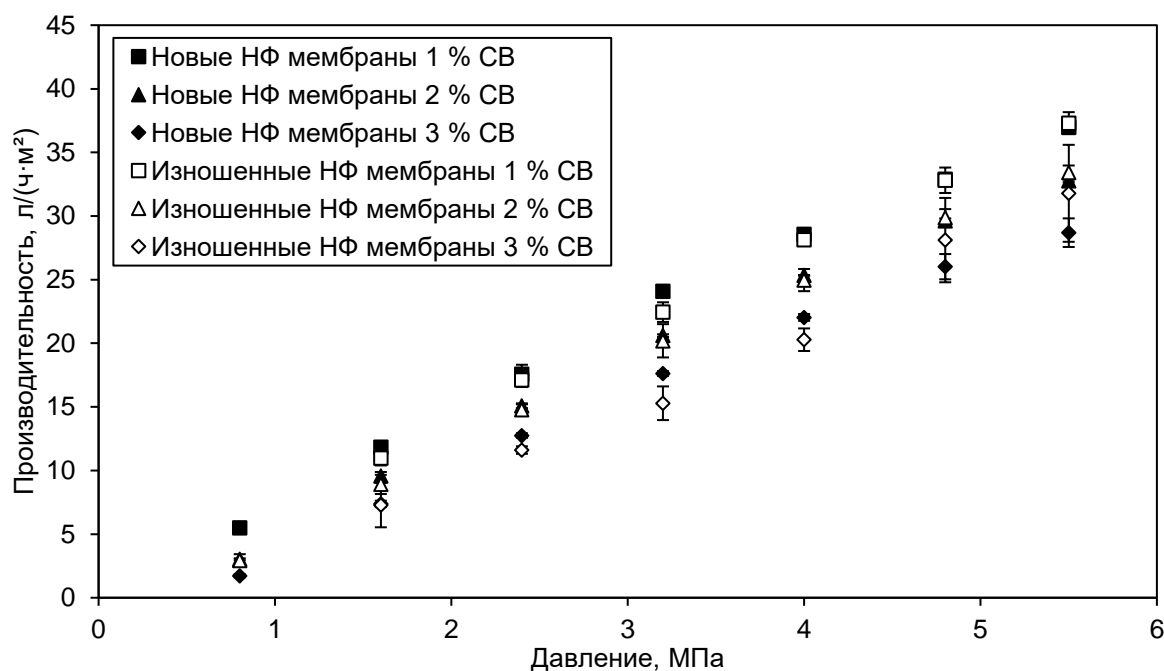


Рисунок 2 – Зависимость производительности от давления при обратном осмосе НФ пермеата

Давление 4 МПа было принято, как рациональное значение параметра, обеспечивающее интенсификацию процесса за счет увеличения потока пермеата без перехода в область предельно допустимых эксплуатационных нагрузок на мембранный элемент.

Мембранное оборудование пищевых производств, как правило, функционирует в 24-часовом цикле с перерывами на мойку. Поэтому было изучено влияние ФК на скорость потока пермеата при концентрировании НФ пермеата в условиях длительных непрерывных выработок, продолжительность которых составляла 6 часов (рисунок 3).

Установлено, что при использовании НФ пермеата, полученного на новых мембранах, начальный поток через ОО мембрану был до 20 % ниже по сравнению с изношенными, что связано с более высокой осмотической концентрацией. Полученные данные говорят фактически об отсутствии мембранного загрязнения при концентрировании НФ пермеатов вплоть до содержания СВ 4 %.

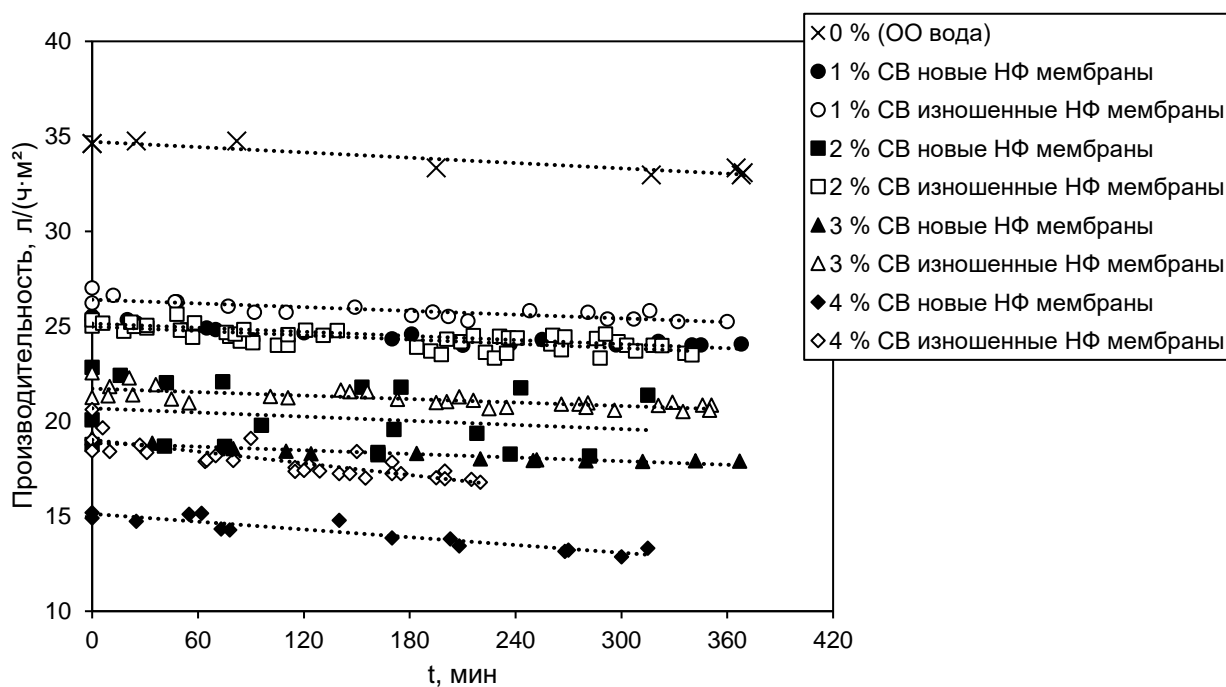


Рисунок 3 – Снижение производительности ОО установки в течение выработки

Параметры ОО пермеатов представлены в таблице 2.

В ОО пермеатах обнаружено от 32 до 225 мг/кг СВ, в среднем по всем исследованным образцам около 80 мг/кг (таблица 2).

В таблице 2 представлены рН ОО пермеатов, полученных при различных режимах фильтрации: средний рН пермеатов составлял 5,00 при диапазоне 4,64–5,44, что в среднем на единицу ниже, чем в исходном сырье. В разных сериях наблюдались либо незначительные колебания, либо умеренное повышение рН при увеличении степени концентрирования.

Титруемая кислотность в образцах ОО пермеата, полученных из НФ пермеатов, составляла от 0,20 до 0,85 °Т (в среднем 0,47 °Т). Давление и ФК в исследованных диапазонах не оказывали существенного влияния на этот показатель (таблица 2).

В отличие от рассмотренных выше параметров пермеатов, УЭП в основном достоверно зависела от режимов фильтрации (таблица 2). В большей степени на УЭП оказывал влияние ФК сырья. Однако также выявлено снижение УЭП пермеата с возрастанием давления при фильтрации наиболее концентрированного сырья. УЭП пермеатов варьировалась от 18 до 273 мкСм/см, т. е. не превышала типичную УЭП водопроводной воды. Эффективность переработки НФ пермеата в результате ОО

можно определить как снижение УЭП в пермеате относительно исходного НФ пермеата, которая составляла в проведенных выработках от 94,2 до 98,99 %. Наименьшие значения УЭП и содержания СВ наблюдалось в ОО пермеатах, полученных при высоких давлениях и низких содержаниях СВ в ретентате.

Таблица 2 – Свойства ОО пермеатов, полученных при фильтрации НФ пермеата молочного сырья ($n = 3$)

Давление, МПа	СВ в ретентате по рефрактометру, %	СВ в пермеате, мг/кг	УЭП в пермеате, мкСм/см *	рН пермеата	Титруемая кислотность пермеата, °Т
Изношенные НФ мембраны					
20	1,0	93 ± 43	65,8 ± 21,3 ^{a**}	5,06 ± 0,10	0,61 ± 0,22
	2,0	106 ± 35	121,0 ± 26,5 ^{ab}	5,04 ± 0,21	0,43 ± 0,04
	3,0	111 ± 25	192,2 ± 65,1 ^{bA}	5,16 ± 0,30	0,33 ± 0,03
40	1,0	77 ± 30	52,2 ± 20,4 ^a	4,89 ± 0,19	0,52 ± 0,03
	2,0	67 ± 17	72,9 ± 17,4 ^a	4,89 ± 0,18	0,49 ± 0,26
	3,0	82 ± 6	113,1 ± 22,5 ^{bB}	4,96 ± 0,17	0,39 ± 0,09
55	1,0	50 ± 13	45,1 ± 16,0 ^a	4,82 ± 0,20	0,54 ± 0,01
	2,0	77 ± 26	64,4 ± 17,9 ^a	4,83 ± 0,19	0,53 ± 0,23
	3,0	71 ± 19	95,5 ± 22,8 ^{bB}	4,93 ± 0,25	0,42 ± 0,08
Новые НФ мембраны					
20	1,0	64 ± 42	58 ± 28	5,07 ± 0,11	0,48 ± 0,11
	2,0	114 ± 42	102 ± 54	5,19 ± 0,11	0,52 ± 0,08
	3,0	137 ± 81	154 ± 57	5,29 ± 0,08	0,45 ± 0,05
40	1,0	61 ± 31	46 ± 19	4,92 ± 0,07	0,45 ± 0,05
	2,0	84 ± 26	85 ± 34	5,07 ± 0,04	0,43 ± 0,07
	3,0	79 ± 49	119 ± 50	5,21 ± 0,09	0,48 ± 0,08
55	1,0	55 ± 20	39 ± 18	4,94 ± 0,05	0,45 ± 0,13
	2,0	53 ± 16	65 ± 28	4,99 ± 0,10	0,50 ± 0,10
	3,0	63 ± 22	90 ± 35	5,07 ± 0,13	0,53 ± 0,13
* $n = 5$					
** Значения, отмеченные разными буквами, отличаются значимо: строчные буквы используются для сравнения пермеатов, полученных при одинаковом давлении, заглавные буквы используются для сравнения пермеатов, полученных при одинаковой степени концентрирования сырья					

Коррозионная активность ОО пермеатов хорошо известна в сфере водоподготовки и опреснения морской воды и связана с кислой реакцией среды, наличием хлоридов и низким содержанием гидрокарбонатов. Чтобы оценить коррозионность ОО пермеата, пластины из стали AISI 304 выдерживали в ОО пермеате в течение 30 дней при комнатной температуре. Визуальных признаков коррозии не выявлено, а потеря массы после зачистки и травления не превышала

0,001 %. Полученные результаты свидетельствуют, что ОО пермеат из НФ пермеата молочного сыря не оказывает коррозионного воздействия на сталь AISI 304.

Микробиологические показатели ОО пермеата в процессе хранения исследовали в условиях, имитирующих промышленное емкостное оборудование. Определяли количество мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов (КМАФАнМ), дрожжи, плесени и бактерии группы кишечной палочки (БГКП) после хранения при температурах 25 °С и 4 °С.

Результаты посевов ОО пермеатов, хранившихся с охлаждением и без охлаждения, представлены в таблицах 3–5.

Таблица 3 – КМАФАнМ в ОО пермеате

Время инкубирования, ч	Прирост КМАФАнМ, lg(КОЕ/мл)	
	25 °С	4 °С
24	0,04	Н/Д
72	2,06	Не обнаружено в 0,01 мл

Таблица 4 – Содержание БГКП в ОО пермеате

Время инкубирования, ч	БГКП, наличие или отсутствие в объеме, 1 повт./2 повт.		
	25 °С		4 °С
	1,0 мл	0,1 мл	1,0 мл
0	+/-	-/-	-/-
24	-/-	-/-	Н/Д
72	+/+	+/+	-/-

Таблица 5 – Количество дрожжевых и плесневых грибов в ОО пермеате

Время инкубирования, ч	Дрожжи, КОЕ/мл, 1 повт./2 повт.		Плесени, КОЕ/мл, 1 повт./2 повт.	
	25 °С	4 °С	25 °С	4 °С
0	4/0	Не обнаружено в 1 мл	Не обнаружено в 1 мл	Не обнаружено в 1 мл
24	0/35	Н/Д	Не обнаружено в 1 мл	Н/Д
72	256/770	Не обнаружено в 1 мл	Не обнаружено в 1 мл	Не обнаружено в 1 мл

В охлажденных ОО пермеатах КМАФАнМ составляло менее 100 КОЕ/мл как непосредственно после отбора, так и после 72 ч хранения; роста микроорганизмов не выявлено, БГКП и микроскопические грибы отсутствовали. При хранении при

комнатной температуре микробиологическая стабильность сохранялась не более 24 ч, а через 72 ч прирост КМАФАнМ составлял $2,06 \lg(\text{КОЕ/мл})$.

Помимо качества пермеата, важным фактором является состояние оборудования: микроорганизмы способны образовывать биопленки, устойчивые к стандартным моющим растворам и являющиеся источником систематического загрязнения. Образование биопленки при хранении ОО пермеата (4°C) исследовали на модели теплоизолированных емкостей из нержавеющей стали (1 л, SUS304). Проводилась ежедневная замена пермеата, имитирующая эксплуатацию промышленной емкости без мойки.

Несмотря на практически полное отсутствие в ОО пермеате мезофильных микроорганизмов, плесеней и низкое содержание дрожжей после 7 суток хранения, в смывах были выявлены все исследованные группы микроорганизмов. Это подтверждает способность микрофлоры формировать биопленки даже при низкой исходной обсемененности продукта и подчеркивает необходимость регулярной мойки оборудования с интервалом не реже одного раза в 3–7 суток при условии соблюдения температурного режима и ежедневного обновления содержимого.

В результате переработки НФ пермеата методом ОО образовывался побочный продукт ОО ретентат (таблица 6). Данный ретентат характеризовался содержанием СВ в пределах 1–3 %. Минеральный состав ретентата включал макроэлементы, такие как натрий, калий, кальций, магний и фосфор.

Таблица 6 – Состав и свойства ОО ретентатов

	СВ по рефрактометру, г/100 г		
	1,0	2,0	3,0
Новые НФ мембраны			
СВ, г/100 г	$0,84 \pm 0,12$	$1,75 \pm 0,13$	$2,49 \pm 0,52$
УЭП, мСм/см	$6,42 \pm 2,04$	$15,13 \pm 4,11$	$16,53 \pm 0,39$
рН	$6,76 \pm 0,40$	$7,37 \pm 0,10$	$6,99 \pm 0,37$
Титруемая кислотность, °Т	$5,8 \pm 0,3$	$8,0 \pm 2,3$	$26,3 \pm 18,0$
Зола, г/100 г	$0,33 \pm 0,16$	$0,87 \pm 0,24$	$1,08 \pm 0,06$
Натрий, мг/кг	552 ± 21	1009 ± 219	1334 ± 58
Калий, мг/кг	1381 ± 15	2370 ± 784	2909 ± 681
Магний, мг/кг	8 ± 2	13 ± 4	25 ± 8
Кальций, мг/кг	51 ± 11	73 ± 8	131 ± 38
Хлорид, мг/кг	1634 ± 23	2757 ± 1176	2073 ± 614
Фосфат, мг/кг	184 ± 10	341 ± 24	794 ± 91

Продолжение таблицы 6

Изношенные НФ мембраны			
СВ, г/100 г	0,94 ± 0,05	1,62 ± 0,16	2,16 ± 0,43
УЭП, мСм/см	5,67 ± 0,82	10,39 ± 1,05	15,48 ± 1,55
рН	6,41 ± 0,25	6,57 ± 0,18	6,77 ± 0,24
Титруемая кислотность, °Т	2,8 ± 0,7	4,9 ± 1,1	7,1 ± 0,3
Зола, г/100 г	0,31 ± 0,05	0,60 ± 0,08	0,85 ± 0,08
Натрий, мг/кг	353 ± 51	715 ± 115	1080 ± 115
Калий, мг/кг	843 ± 118	1533 ± 186	2082 ± 219
Магний, мг/кг	8 ± 0	16 ± 2	24 ± 5
Кальций, мг/кг	46 ± 2	78 ± 4	118 ± 40
Хлорид, мг/кг	1028 ± 200	1832 ± 238	2371 ± 215
Фосфат, мг/кг	366 ± 13	774 ± 148	1257 ± 97

Минеральный состав ОО ретентата позволяет рассматривать его в качестве перспективного заменителя поваренной соли, поскольку массовая доля калия в нем превышает массовую долю натрия. Повышение соотношения К:Na в рационе питания имеет важное значение для профилактики сердечно-сосудистых заболеваний. Наиболее целесообразным представляется использование ретентата в производстве жидких кисломолочных продуктов. Особенно актуально его применение в айране – традиционном кисломолочном напитке с добавлением соли и воды.

Высокое содержание солей в ОО ретентате обуславливает риск образования в нем минерального осадка, в особенности – при пониженной температуре. Моделирование хранения охлажденного ретентата показало, что при концентрировании НФ пермеата до 3,0 г/100 г СВ осадкообразование в ретентате не наблюдалось, что подтверждает стабильность системы в данном диапазоне концентраций.

Состав осадка, в свою очередь, позволяет заключить об обратимости загрязнения, которое он потенциально может вызывать, поскольку все его компоненты хорошо растворимы в воде или кислотных моющих растворах.

В четвертой главе был проведен подбор рецептуры и исследование органолептических свойств айрана с ОО ретентатом.

Для получения сведений о составе айрана, представленного на российском рынке, были отобраны и проанализированы образцы из крупных сетей розничной торговли.

Анализ выявил существенный разброс по заявленному содержанию макронутриентов в выборке коммерческих продуктов. От 2,6 до 7,9 г/100 г СВ обнаружено в продуктах, в то время как содержание золы составляло от 0,7 до 1,2 г/100 г.

Содержание минералов позволяет оценить дозировку соли в продукте: во всех образцах Na и Cl составляли >50 % минеральной фракции, что свидетельствует о добавлении поваренной соли. Массовое соотношение K:Na в айранах составляло в среднем 0,27, что существенно ниже, чем значение 1,75, выведенное из рекомендованного ВОЗ потребления этих элементов.

На основании анализа минеральной фракции айранов можно сделать вывод о доминировании на рынке варианта айрана, произведенного с разбавлением водой и добавлением поваренной соли в той или иной дозировке. Этот вариант продукта принят за основу при разработке технологии по использованию ОО ретентата в рецептуре напитка.

Проведено сравнение образцов айрана с различной степенью замещения поваренной соли на ОО ретентат. Органолептическая оценка показала, что полная замена соли сопровождается ухудшением вкуса напитка. Наилучшие результаты получены при 50%-ной замене: образец не отличался по вкусу от традиционного айрана, не имел посторонних привкусов.

На следующем этапе исследования, на основании рецептурных составов, были приготовлены образцы айрана для эксперимента, направленного на определение предельно допустимых сроков хранения готового продукта. В образцах контролировались количество молочнокислых микроорганизмов, дрожжей, титруемая и активная кислотность (таблица 7).

На основании данных таблицы 7 установлено, что айран сохраняет стабильность по основным показателям в течение 20 суток хранения. Титруемая кислотность остается в пределах нормы, уровень плесеней не превышает 10 КОЕ/мл, что соответствует требованиям ТР ТС 033/2013. Количество молочнокислых микроорганизмов также соответствует нормативам, что связано с использованием закваски Micro Milk KF 85/1, содержащей *Streptococcus thermophilus*, *Lactobacillus*

delbrueckii subsp. *bulgaricus* и *Debaryomyces hansenii*. Температура сквашивания 33 °С ограничивает рост дрожжей, в результате чего их содержание в продукте составляет $1,4 \times 10^2$ КОЕ/мл. Однако к 20-му дню хранения при 2–4 °С наблюдается их увеличение до $2,0 \times 10^3$ КОЕ/мл за счет психротолерантности *D. hansenii*.

Таблица 7 – Динамика изменения показателей в образцах айрана при хранении

Наименование образца	Измеряемые показатели	Продолжительность хранения, суток				
		0	5	10	15	20
Айран (контроль)	Количество молочнокислых микроорганизмов, КОЕ/мл	$2,3 \times 10^8$	$1,6 \times 10^8$	$2,0 \times 10^8$	–	$1,3 \times 10^8$
	Количество дрожжей, КОЕ/мл	$1,1 \times 10^2$	–	–	–	3×10^3
	Плесени, КОЕ/мл	<10	–	–	–	<10
	Титруемая кислотность, °Т	69	69	69	70	70
	рН	3,96	3,9	3,9	3,9	3,92
Айран (эксперимент)	Количество молочнокислых микроорганизмов, КОЕ/мл	$2,2 \times 10^8$	$1,5 \times 10^8$	$1,7 \times 10^8$	–	$1,6 \times 10^8$
	Количество дрожжей, КОЕ/мл	$1,4 \times 10^2$	–	–	–	$2,0 \times 10^3$
	Плесени, КОЕ/мл	<10	–	–	–	<10
	Титруемая кислотность, °Т	75	75	75	77	78
	рН	4,05	4,0	4,02	4,07	4,02

В пятой главе представлена разработанная технология переработки НФ пермеата и производства айрана с использованием ОО ретентата; ее аппаратурная схема приведена на рисунке 4. Также приведена оценка экономической эффективности внедрения технологии переработки НФ пермеата.

Цельное молоко принимают в соответствии с требованиями ГОСТ Р 52054–2023, охлаждают до 4 °С и резервируют при температуре 4 ± 2 °С. Затем молоко подогревают до 35–45 °С и сепарируют с получением сливок и обезжиренного молока. Для составления смеси используют обрат, сливки с массовой долей жира (м.д.ж.) 33 %, воду, ОО ретентат и раствор поваренной соли. Смесь подогревают до 55–65 °С, гомогенизируют при давлении 15–17 МПа, пастеризуют при 87–93 °С с выдержкой 20 с и охлаждают до 33 ± 2 °С.

Заквашивание проводят с использованием сухой закваски прямого внесения или производственной закваски в количестве 3–5 % от массы смеси. В состав заквасочной культуры входят *S. thermophilus*, *L. delbrueckii* subsp. *bulgaricus* и

дрожжи. Смесь перемешивают в течение 13–17 мин и сквашивают 10–12 ч при температуре 32 ± 2 °С. Розлив осуществляют при постоянном перемешивании и температуре 17–18 °С в ПЭТ бутылки. Готовый продукт охлаждают до 4–6 °С.

Процесс производства ОО ретентата. УФ пермеат молока или молочной сыворотки концентрируют методом НФ при 10–15 °С и давлении 2–3 МПа через мембраны с отсечкой по молекулярной массе 200–300 Да (ФК 4,5–6,0). Полученный НФ пермеат направляют на ОО, который проводят при 15–19 °С, давлении 4 МПа и ФК 4–7. ОО ретентат с содержанием СВ 3,0–3,5 % используют при производстве айрана, а ОО пермеат – для технологических нужд. Рецепт для производства айрана с добавлением ОО ретентата представлена в таблице 8.

Таблица 8 – Рецепт айрана с ОО ретентатом на 1 т при использовании сухой заквасочной культуры

Ингредиенты	Молоко (м.д.ж. 0,05 %)	Сливки (м.д.ж. 30 %)	ОО ретентат	Вода	Соль поваренная
Масса, кг	487,2	62,9	160	287,2	2,7

В качестве меры экономического эффекта от внедрения переработки НФ пермеата на молочном производстве использовалась разность себестоимостей двух процессов: подготовки одного м³ обратноосмотической воды из воды централизованного водоснабжения и одного м³ обратноосмотического пермеата из НФ пермеата молочного происхождения. Структура себестоимости воды в двух рассматриваемых сценариях отличается коренным образом. Водоподготовка сетевой воды характеризуется высокой стоимостью сырья для процесса, а эксплуатационные расходы сравнительно малы. Переработка НФ пермеата, напротив, использует практически бесплатный отход производства, но более затратна по статьям эксплуатационных расходов на одну выработку.

Рассчитанные с учетом упомянутых параметров себестоимости обратного осмоса сетевой воды и НФ пермеата составили 112,6–115,9 Р м³ и 82,5–89,6 Р м³ соответственно в диапазоне суточных мощностей 50–300 м³. Экономический эффект, таким образом, составил 26,3–30,0 Р м³ в зависимости от принятого масштаба.

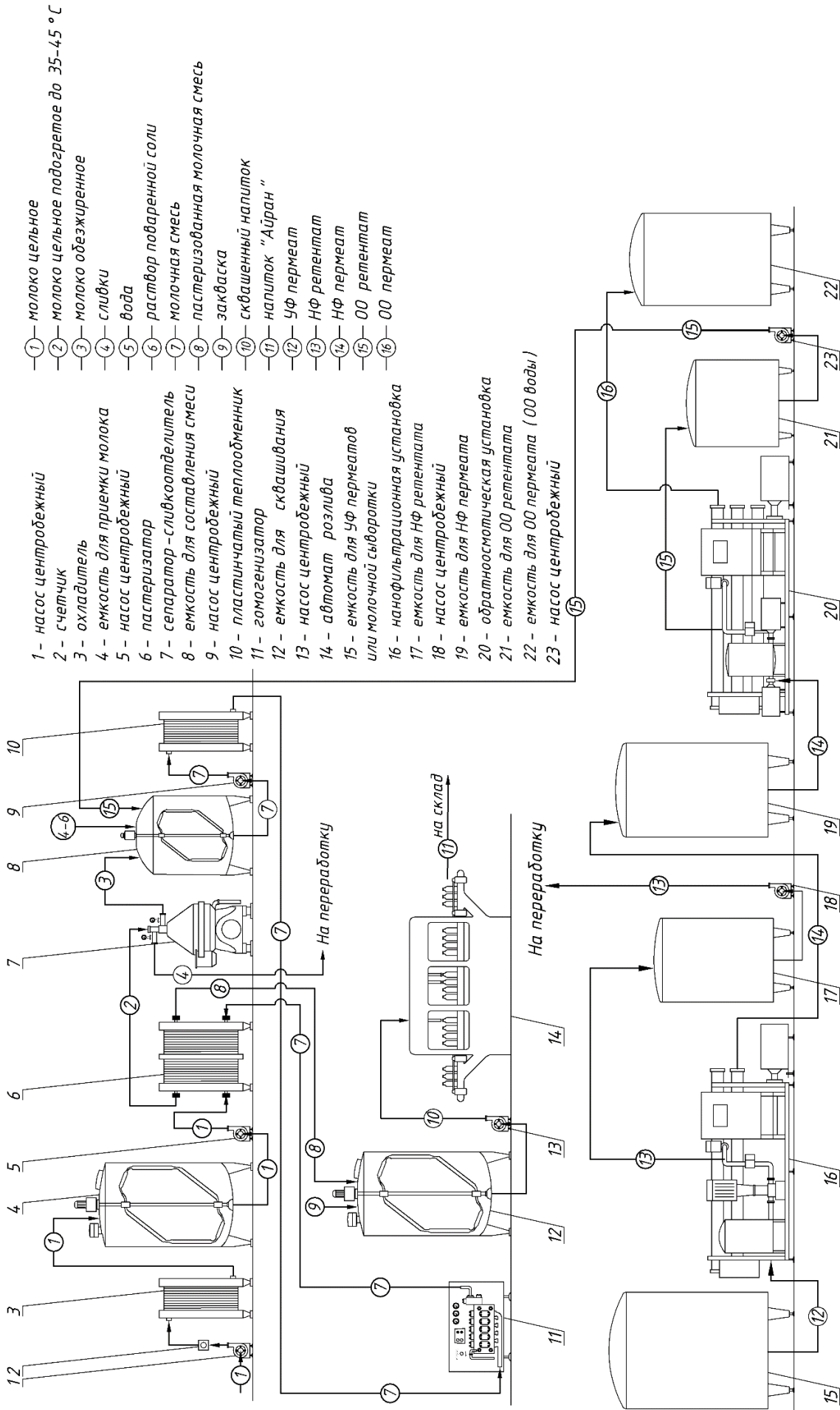


Рисунок 4 – Аппаратурная схема получения айрана с заменой поваренной соли на ОО ретенат

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенных исследований сделаны следующие выводы и рекомендации.

1) Установлено, что в процессе длительной эксплуатации НФ мембран (около 700 производственных циклов) снижается содержание зольного остатка в сухом веществе НФ пермеата на 6 % по сравнению с пермеатами, полученными при использовании новых мембран (до 100 производственных циклов). Также отмечено снижение селективности НФ мембран по лактозе, которое приводило к увеличению ее концентрации в сухом веществе НФ пермеата на 35 %.

2) В результате исследований установлено, что концентрирования НФ пермеата обратным осмосом является оптимальным до содержания СВ в ретентате 3 %. При более высокой концентрации ретентата наблюдается снижение производительности мембран, обусловленное ростом осмотического давления и концентрационной поляризации. Показано, что поток пермеата линейно зависит от давления ($R^2 \geq 0,9821$).

3) Ретентат, полученный при обратноосмотической переработке НФ пермеата молочного сырья, характеризуется содержанием СВ в пределах 1–3 % и минеральным составом, включающим макроэлементы, такие как калий, натрий, кальций, магний и фосфор. Научно обоснована возможность использования ОО ретентата в рецептуре айрана для коррекции минерального состава.

Исследован состав ОО пермеатов при разном давлении и содержании СВ в ретентате. СВ изменялись от 32 до 225 мг/кг в среднем по всем образцам около 80 мг/кг, рН варьировался от 4,64 до 5,44 (в среднем 5), титруемая от 0,20 до 0,85 °Т (в среднем 0,47 °Т), УЭП от 18 до 273 мкСм/см (в среднем 87,5 мкСм/см). Наименьшие значения УЭП и содержания СВ наблюдалось в образцах, полученных при высоких давлениях и небольших ФК.

4) Проведенный тест с использованием нержавеющей стали AISI 304 показал, что ОО пермеат не вызывает коррозии материала при 30 суточном контакте. По завершении выдерживания в ОО пермеате, а также после механической зачистки и

кислотного травления, потеря массы стальных пластин не превышала 0,001 %, коррозионной активности не зафиксировано.

5) Установлено, что ОО пермеат сохраняет микробиологическую стабильность до 1 суток при температуре 25 °С и до 3 суток при охлаждении (4 °С). Подтверждена необходимость регулярной мойки оборудования с интервалом не более 3–7 суток при условии соблюдения низкотемпературного режима хранения и ежедневной замены ОО пермеата.

6) Разработана рецептура и технология производства айрана с 50%-ной заменой поваренной соли ОО ретентатом, что позволяет снизить содержание натрия в продукте без заметного изменения традиционного вкуса айрана и появления пороков продукта.

Установлено, что айран, произведенный по разработанной технологии, сохраняет стабильность основных показателей в течение 20 суток хранения. Титруемая кислотность оставалась практически неизменной, содержание молочнокислых микроорганизмов соответствовало требованиям ТР ТС 033/2013.

7) Рассчитанная себестоимость получения 1 м³ обратноосмотической воды из НФ пермеата составляла 82,5–89,6 Р против 112,6–115,9 Р при использовании сетевой воды. Таким образом, величина экономического эффекта от переработки НФ пермеата составила 26,3–30,0 Р на м³.

Дальнейшие исследования в рамках темы работы заключаются в расширении направлений использования ОО ретентата в качестве солезаменителя при производстве кисломолочных напитков, овощных соков, соусов и других продуктов профилактической направленности, предназначенных для коррекции минерального состава рациона.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

Статьи в научных изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России:

1. **Гавриш, А. В.** Обратноосмотическая очистка пермеатов, полученных при нанофильтрации молочного сырья / А. В. Гавриш, Г. С. Анисимов, В. А. Кравцов, И. А. Евдокимов, Д. С. Мамай // Молочная промышленность. – 2023. – №5. – С. 16–18.

2. **Гавриш, А. В.** Микробиологическая стабильность пермеата нанофильтрации, очищенного обратным осмосом / А. В. Гавриш, В. А. Кравцов, Г. С. Анисимов, М. Е. Косенко, Д. С. Мамай // Молочная промышленность. – 2025. – №2. – С. 78–83.

Статьи в журналах и сборниках материалов конференций:

3. **Гавриш, А. В.** Перспективность выделения воды из пермеата нанофильтрации молочного сырья методом обратного осмоса / А. В. Гавриш, Г. С. Анисимов, В. А. Лисицын, Д. С. Мамай // // Материалы XXII международной НПК «Современные проблемы техники и технологии пищевых производств». – Барнаул: АлтГТУ. – 2022. – С. 75–78.

4. **Гавриш, А. В.** Влияние износа нанофильтрационных мембран на очистку нанофильтрационного пермеата обратным осмосом / А. В. Гавриш, Г. С. Анисимов, В. А. Кравцов [и др.] // Материалы X (67-й) ежегодной НПК «Университетская наука – региону». Биоразнообразие, биоресурсы, вопросы биотехнологии и здоровье населения Северо-Кавказского региона. – Ставрополь: СКФУ. – 2023. – С. 100–102.

5. **Гавриш, А. В.** Исследование осадкообразования в ретентате при обратноосмотической очистке НФ пермеата молочного сырья / А. В. Гавриш, Д. С. Мамай // Материалы XI (68-й) ежегодной НПК «Университетская наука – региону». Биоразнообразие, биоресурсы, вопросы биотехнологии и здоровье населения Северо-Кавказского региона. – Ставрополь: СКФУ. – 2024. – С. 218–222.

6. **Гавриш, А. В.** Обратный осмос для валоризации нанофильтрационного пермеата на молочном производстве / А. В. Гавриш, В. А. Кравцов, Г. С. Анисимов, Д. С. Мамай // Материалы XVI Международной научной конференции «Мембраны–2025». – 2025. – С. 279–281.

7. **Гавриш, А. В.** Коррозионная активность пермеата обратного осмоса молочного происхождения по отношению к пищевой нержавеющей стали / А. В. Гавриш, Д. С. Мамай // Материалы национальной с международным участием НПК «Инновационные направления развития в образовании, экономике, технике и технологиях». – Ставрополь. – 2025. – С. 405–407.

Патенты на изобретение:

8. Патент № 2827192 РФ, Способ получения технической воды из нанофильтрационного пермеата молочного сырья: МПК A23C 9/144, B01D 61/02 / **А. В. Гавриш, В. А. Кравцов, Г. С. Анисимов;** заявитель Акционерное общество «Молочный комбинат «Ставропольский»; опубл. 23.09.2024. – 5 с.