

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО
ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ТАМБОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

Богомолов Владимир Юрьевич

УДК 542.816; 66.021.3; 637.344

**РАЗРАБОТКА И НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРОЦЕССА
УЛЬТРАФИЛЬТРАЦИОННОГО КОНЦЕНТРИРОВАНИЯ
И ДЕМИНЕРАЛИЗАЦИИ ПОДСЫРНОЙ СЫВОРОТКИ**

Специальность:

05.18.12 – «Процессы и аппараты пищевых производств»

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

д.т.н., профессор Лазарев С.И.

Тамбов 2015

ОГЛАВЛЕНИЕ

ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ	5
ВВЕДЕНИЕ	6
1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРНЫХ ДАННЫХ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ВТОРИЧНОГО МОЛОЧНОГО СЫРЬЯ	14
1.1 Классификация вторичного молочного сырья и способы его использования	14
1.2 Классические методы разделения растворов молочных производств	18
1.2.1 Тепловые методы	18
1.2.2 Центробежные методы	20
1.2.3 Консервирование	24
1.2.4 Биологические методы обогащения молочной сыворотки	26
1.2.5 Мембранные методы обработки	26
1.3 Электро- и баромембранные методы разделения растворов	27
1.3.1 Микрофльтрация	27
1.3.2 Ультрафльтрация	27
1.3.3 Обратный осмос	29
1.3.4 Электродиализ	31
1.3.5 Гельфльтрация	33
1.3.6 Сорбция – десорбция	35
1.3.7 Ионный обмен	36
1.4 Математические модели, используемые для описания кинетики мембранного разделения растворов	37
1.4.1 Капиллярно-пористая модель	37
1.4.2 Модель растворения-диффузии	38
1.4.3 Термодинамическая модель	40
1.4.4 Уравнения переноса при электробаромембранном разделении	41
1.5 Методы расчета технологических и прочностных характеристик мембранных аппаратов и установок	42

1.6	Аппаратурно-технологическое оформление мембранных процессов	44
1.7	Выводы по главе и формулировка цели и задач исследования	47
2.	ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ	49
2.1	Объекты исследований	49
2.1.1	Мембраны	49
2.1.2	Промышленные растворы	50
2.1.3	Модельные растворы	52
2.2	Методика и экспериментальная установка для исследования диффузионного потока	52
2.3	Методика и лабораторное оборудование для исследования сорбционных свойств мембран	55
2.4	Методика и экспериментальная установка для исследования коэффициента задержания и удельного потока растворителя	57
2.5	Выводы по второй главе	61
3.	РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ КИНЕТИКИ КОНЦЕНТРИРОВАНИЯ ПОДСЫРНОЙ СЫВОРОТКИ	62
3.1	Исследования сорбционных свойств мембран	62
3.2	Исследования диффузионных свойств мембран	67
3.3	Исследования коэффициентов задержания	72
3.4	Экспериментальное определение характеристик электрических импульсов	76
3.5	Исследования коэффициентов задержания с наложением электрических импульсов	78
3.6	Исследования удельного потока растворителя	85
3.7	Выводы по третьей главе	91
4.	МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА УЛЬТРАФИЛЬТРАЦИОННОГО КОНЦЕНТРИРОВАНИЯ И ДЕМИНЕРАЛИЗАЦИИ ПОДСЫРНОЙ СЫВОРОТКИ	92

4.1	Построение математической модели процесса ультрафильтрационного концентрирования и деминерализации подсырной сыворотки	92
4.2	Проверка адекватности модели	98
4.3	Расчет периода эффективной работы мембран	100
4.4	Выводы по четвертой главе	103
5.	ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОФОРМЛЕНИЕ ПРОЦЕССА УЛЬТРАФИЛЬТРАЦИОННОГО КОНЦЕНТРИРОВАНИЯ И ДЕМИНЕРАЛИЗАЦИИ ПОДСЫРНОЙ СЫВОРОТКИ	104
5.1	Разработка конструкции ультрафильтрационного аппарата плоскокамерного типа	104
5.2	Методика расчета ультрафильтрационного аппарата для концентрирования и деминерализации подсырной сыворотки	107
5.3	Разработка технологической схемы ультрафильтрационного концентрирования и деминерализации подсырной сыворотки для ООО «Бондарский сыродельный завод»	110
5.4	Расчет экономической эффективности ультрафильтрационного концентрирования и деминерализации подсырной сыворотки на ООО «Бондарский сыродельный завод»	112
5.5	Выводы по пятой главе	118
	ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ	120
	СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ	123
	ПРИЛОЖЕНИЯ	138

ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

K – коэффициент задержания;

$C_{пер}$ – концентрация растворенных веществ в пермеате, кг/м³;

$C_{исх}$ – концентрация растворенных веществ в исходном растворе, кг/м³;

F_m – площадь мембраны, м²;

τ – время проведения эксперимента, с;

J – удельный поток растворителя, м³/(м²·с);

k_p – коэффициент распределения;

C_m – концентрация растворенных веществ в мембране, кг/м³;

P_δ – коэффициент диффузионной проницаемости, м²/с;

δ – толщина мембраны, м;

T – температура, К;

ΔP – рабочее давление, МПа;

D_δ – коэффициент диффузии, м²/с;

i – плотность тока, А/м²;

η – выход по току;

$\Delta\pi$ – разность осмотических давлений, МПа;

α – гидродинамическая проницаемость, м³/(м²·с·Па);

σ_k – контактное напряжение, МПа;

K_k – коэффициент концентрирования;

V – объем пермеата, м³.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность избранной темы. Эффективность промышленной переработки молока в России, на сегодня, неразрывно связана с внедрением новых безотходных или малоотходных технологий и технических решений, позволяющих перерабатывать вторичное молочное сырье и извлекать из него ценные, в т.ч. белковые, продукты. В России на производстве сыра специализируются, по разным данным, более 100 – 150 заводов. Рассмотрим в данной работе процесс переработки молока на примере одного из действующих предприятий в Тамбовской области – ООО «Бондарский сыродельный завод».

Процесс производства сыра на данном предприятии организован по традиционной для получения сычужных сыров схеме – сырная масса свертывается из молока под действием сычужных ферментов, которые в незначительных количествах добавляются к массе молока. Вторичным продуктом при такой схеме производства является молочная, или подсырная, сыворотка – жидкая масса, остающаяся после извлечения белковых компонентов молока, свернувшихся под действием сычужных ферментов. В результате технологического процесса масса сыра составляет 10 – 20 % массы исходного молока, а 80 – 90 % массы приходится на молочную сыворотку.

Долгое время в России молочная сыворотка считалась отходом производства и сбрасывалась на очистные сооружения. В некоторых случаях такая сыворотка использовалась в кормовых целях для сельскохозяйственных животных или в качестве удобрения. Однако, использование сыворотки в качестве удобрения, даже в разбавленном виде, ведет к угнетению роста многих сельскохозяйственных культур [1, 2]. Кроме того, использование сыворотки сопряжено с дополнительными сложностями, ввиду ее высокой биологической активности. Поэтому широкое распространение получила практика утилизации подсырной сыворотки на очистных сооружениях для сточных вод.

По данным Международной молочной ассоциации, из 140 млн. т сыворотки, получаемой в мире, до 50% сливается на очистные сооружения. Но эта сыворотка при должной переработке может служить сырьем для производства различных пищевых продуктов. В молочную сыворотку переходят полноценные белки, которые содержат незаменимые аминокислоты, используемые организмом для синтеза белков печени, образования гемоглобина и плазмы крови. Помимо белков, в сыворотке остаются все водорастворимые витамины, соли и микроэлементы исходного молока. Эти факторы обусловили ценность вторичного молочного сырья для молочной промышленности.

Степень разработанности темы. Совершенствование и удешевление методов переработки вторичного молочного сырья оказывает непосредственное влияние на эффективность переработки молока. В этой области активно ведутся исследования, в т.ч. и с применением мембранных методов. Основные исследования в области переработки молочной сыворотки проводились такими учеными, как Семенов А.Г., Храмцов А.Г., Гаврилов Г.Б., Шапошник В.А., Полянский К.К. и другими.

Цель работы: разработка и научное обоснование процесса ультрафильтрационного концентрирования и деминерализации подсырной сыворотки с импульсным подводом тока.

Задачи работы:

1. Изучить технологические и кинетические характеристики процесса ультрафильтрационного концентрирования и деминерализации подсырной сыворотки с наложением электрических импульсов.

2. Разработать математическую модель процесса ультрафильтрационного концентрирования и деминерализации подсырной сыворотки, отличающуюся от известных представлений, учетом электрического импульса и величины осмотического давления раствора подсырной сыворотки.

3. Разработать численный метод реализации инженерного расчета аппарата для ультрафильтрационного процесса концентрирования и деминерализации подсырной сыворотки с учетом наложения электрического импульса.

4. Предложить численный метод расчета периода функционирования ультрафильтрационных мембран и элементов в процессе концентрирования и деминерализации сыворотки.

5. Разработать высокоэффективную конструкцию ультрафильтрационного аппарата плоскокамерного типа для концентрирования и деминерализации подсырной сыворотки с импульсным подводом тока.

6. Определить рациональные условия реализации процесса ультрафильтрационного концентрирования и деминерализации подсырной сыворотки с импульсным подводом тока.

7. Усовершенствовать технологическую схему линии концентрирования и деминерализации подсырной сыворотки для ООО «Бондарский сыродельный завод». Обосновать экономическую эффективность.

Научная новизна:

Изучены кинетические и технологические закономерности процесса ультрафильтрационного концентрирования и деминерализации подсырной сыворотки, в том числе с импульсным подводом тока. Получены и интерпретированы экспериментальные данные по коэффициенту задержания, удельному потоку растворителя, диффузионному потоку и коэффициенту распределения ультрафильтрационного концентрирования и деминерализации подсырной сыворотки в зависимости от концентрации, температуры, величины импульса тока и вида полупроницаемой мембраны.

Получены аппроксимационные зависимости и численные значения эмпирических коэффициентов для теоретического расчета и прогнозирования коэффициента задержания, коэффициента распределения,

диффузионного потока и удельного потока растворителя процесса ультрафильтрационного концентрирования и деминерализации подсырной сыворотки, в том числе с импульсным подводом тока. Выявлен и математически описан поточно-диффузионный механизм переноса растворенного вещества и растворителя при ультрафильтрационном концентрировании и деминерализации подсырной сыворотки.

Разработана математическая модель процесса ультрафильтрационного концентрирования и деминерализации подсырной сыворотки с импульсным подводом тока учитывающая влияние электрического импульса и величину осмотического давления раствора подсырной сыворотки. Модель позволяет рассчитывать концентрации растворенных веществ и объемы растворителя в камерах пермеата и ретентата.

Практическая значимость результатов работы:

Предложена численная реализация методики инженерного расчета ультрафильтрационного аппарата плоскокамерного типа, включающая определение рабочей площади, секционирование аппарата, оценку температуры нагрева и расчет энергозатрат на процесс ультрафильтрационного концентрирования и деминерализации подсырной сыворотки с импульсным подводом тока. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2013618596 [4].

Предложена численная реализация методики определения периода функционирования полупроницаемых мембран в процессе ультрафильтрационного концентрирования и деминерализации подсырной сыворотки с импульсным подводом тока, позволяющая рассчитывать период функционирования мембран до их физического разрушения. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2014615341 [5].

Разработан мембранный аппарат, работающий одновременно в трех технологических режимах – концентрирование, деминерализация и охлаждение или нагрев подсырной сыворотки. Новизна технического

решения подтверждена патентом № 2532813 RU [3]. Разработанный аппарат принят к разработке на ОАО «ТАГАТ» им. С.И. Лившица г. Тамбов.

Разработана программа для ЭВМ позволяющая рассчитывать концентрации растворенных веществ и объемы растворителя в камерах пермеата и ретентата ультрафильтрационного аппарата плоскокамерного типа при концентрировании и деминерализации подсырной сыворотки с импульсным подводом тока. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2015614888 [6].

Экспериментально определены рациональные условия реализации процесса ультрафильтрационного концентрирования и деминерализации подсырной сыворотки с импульсным подводом тока: с применением ультрафильтрационных мембран УПМ-100 при давлении 1 МПа, с наложением электрических импульсов периодом 1 с, плотностью тока 75 А/м² и отводом тепла, обеспечивающим поддержание температуры на уровне 293 К.

Предложена усовершенствованная технологическая схема линии концентрирования и деминерализации подсырной сыворотки ультрафильтрацией с получением сухого сывороточного концентрата. Рассчитана себестоимость производства концентрата. Технологическая схема принята к внедрению на ООО «Бондарский сыродельный завод». Ожидаемый экономический эффект составит 500 тыс. руб. в год в ценах 2015 г [7 - 9]. Расчетная себестоимость производства концентрата составляет 0,29 руб. на 1 руб. товарного продукта.

Методология и методы диссертационного исследования. В основу методологии данного исследования легли как общенаучные, так и частнонаучные методы познания. Приведенные в данной работе методы основаны на известных методиках исследования кинетических характеристик процессов мембранного разделения, математическом моделировании, теоретических основах тепло- и массопереноса в ультрафильтрационных мембранах. Для проверки адекватности полученных аппроксимационных

зависимостей и методик расчета использовались методы статистического анализа.

Степень достоверности. Все результаты, выводы и положения были получены на основании обширного теоретического и экспериментального материала с использованием законов сохранения массы и энергии. При этом достоверность основных положений и выводов диссертации обеспечивается использованием комплекса апробированных экспериментальных методов, воспроизводимостью результатов экспериментов, корреляцией их с имеющимися литературными данными, статистической оценкой экспериментальных данных с доверительной вероятностью 0,95. Отклонение результатов эксперимента и расчета по основным кинетическим коэффициентам процессов ультрафильтрационного концентрирования и деминерализации растворов с импульсным подводом тока не превышало $\pm 10\%$.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты экспериментальных исследований по коэффициенту задержания, удельному потоку растворителя, диффузионному потоку и коэффициенту распределения ультрафильтрационного концентрирования и деминерализации подсырной сыворотки в зависимости от концентрации, температуры и величины импульса электрического тока.

2. Аппроксимационные зависимости и значения эмпирических коэффициентов для теоретического расчета и прогнозирования коэффициента задержания, коэффициента распределения, диффузионного потока и удельного потока растворителя процесса ультрафильтрационного концентрирования и деминерализации подсырной сыворотки, в том числе с импульсным подводом тока.

3. Математическая модель процесса ультрафильтрационного концентрирования и деминерализации подсырной сыворотки с импульсным подводом тока.

4. Численный метод реализации способа определения периода функционирования ультрафильтрационных мембран с учетом набухания.

5. Численный метод реализации инженерного расчета ультрафильтрационного аппарата плоскокамерного типа с импульсным подводом тока.

6. Конструктивные и технологические решения по аппаратурно-технологическому оформлению процесса ультрафильтрационного концентрирования и деминерализации подсырной сыворотки с импульсным подводом тока.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы были доложены на: международной конференции «Перспективные разработки науки и техники» (Польша, 2013 г.); Международной научно-практической конференции «Наука и образование для устойчивого развития экономики, природы и общества» (г. Тамбов, 2013 г.); Международной научно-практической конференции «Современные предпосылки развития инновационной экономики» (г. Тамбов, 2013 г.); Международной научно-практической конференции «Новейшие научные достижения – 2014» (Болгария, 2014 г.); Международной научно-технической конференции «Техника и технологии – 2014» (г. Брянск, 2014 г.); Международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях» (г. Тамбов, 2014 г.); конференции с международным участием «Иониты-2014» (г. Воронеж, 2014 г.); Международной научной конференции «Теоретические и практические аспекты сорбционных и мембранных процессов» (г. Кемерово, 2014 г.); Международной научно-инновационной молодежной конференции «Современные твердофазные технологии» (г. Тамбов, 2014 г.); Международной научно-практической конференции «Современные проблемы теории машин» (г. Новокузнецк, 2015 г.); Международной научной конференции «Актуальные проблемы энергосбережения и энергоэффективности в технических системах» (г. Тамбов, 2015 г.).

Результаты работы докладывались в научных центрах г. Генуя (Италия) и г. Катовице (Польша) во время стажировок по международной программе TEMPUS.

По результатам диссертационной работы опубликованы 30 работ, в том числе 10 статей в журналах, рекомендованных ВАК РФ и 1 статья в журнале, входящем в реферативную базу Scopus. Получено 3 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ и 1 патент на изобретение.

Диссертация состоит из введения, пяти глав и выводов, списка используемых источников и приложений. Диссертация содержит 191 страницу машинописного текста, в том числе 46 рисунков, 25 таблиц, список цитируемых источников, который включает 138 наименований публикаций отечественных и зарубежных авторов.

Работа выполнена при поддержке федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (гос. контракты №№ 16.740.11.0525, 14.740.11.1028, 16.740.11.0659), а также при поддержке ФГБУ "Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере" (договоры гранта № 598ГУ1/2013 от 19.11.2013 г., № 4929ГУ2/2014 от 25.12.2014 г.) и проекта ТЕМПУС 530620-TEMPUS-1-2012-1-IT-ТЕМПУС-JPCR (2013 – 2014 гг.) - обучение в области инновационных технологий в сфере энергосбережения и экологического контроля в российских университетах с участием работодателей "GREEN MASTER".

Автор выражает благодарность заслуженному деятелю науки РФ д.т.н., профессору Полянскому К.К.; коллективу кафедры «Прикладная геометрия и компьютерная графика» ФГБОУ ВПО «ТГТУ»; д.т.н., профессору Кочетову В.И.; к.т.н., доценту Вязовову С.А.; за научные консультации при выполнении данной работы.

1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРНЫХ ДАННЫХ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ВТОРИЧНОГО МОЛОЧНОГО СЫРЬЯ

1.1 Классификация вторичного молочного сырья и способы его использования

Традиционные способы переработки молока и производства молочных продуктов, таких как сыр, творог, белок и другие, способствуют образованию побочных продуктов, которые называют вторичным молочным сырьем. К такому сырью относятся пахта, молочная сыворотка и обезжиренное молоко. К этому же сырью можно отнести побочные продукты переработки молока иными способами, а именно бесказеиновую фазу и ультрафильтрат, а также промывные воды, содержащие цельное молоко.

При этом масса вторичного молочного сырья значительно превышает массу получаемого основного продукта. В составе вторичного молочного сырья остается значительное содержание основных ценных компонентов молока.

Таблица 1.1. Основные компоненты вторичного молочного сырья [1].

Сырье	Массовая доля, %				
	сухих веществ	белков	молочного жира	молочного сахара	минеральных веществ
Цельное молоко	12,3	3,2	3,6	4,8	0,7
Обезжиренное молоко	8,9	3,2	0,05	4,8	0,75
Пахта	9,1	3,2	0,5	4,7	0,7
Молочная сыворотка	6,3	0,9	0,3	4,5	0,6

Во вторичное сырье переходит более половины сухих веществ молока, более 90% молочного сахара и значительное количество белков – от 24 % для молочной сыворотки, до 97% для обезжиренного молока и пахты. Большинство белков, перешедших в молочную сыворотку – сывороточные [10].

В незначительных количествах (1 – 10 %) во вторичное молочное

сырье переходит молочный жир, который отличается высокой дисперсностью – от 0,5 до 1,0 мкм. В свою очередь, минеральные вещества молока переходят во вторичное сырье почти полностью. Кроме того, в сыворотку попадают и соли, вносимые дополнительно для получения основного продукта (сыр, творог, казеин). В продукте остается лишь 2 – 4 % солей.

Помимо основных компонентов молока во вторичное сырье попадают и такие соединения, как витамины, ферменты, фосфатиды, гормоны и небелковые соединения азота [11 - 13].

Таблица 1.2. Витаминный состав вторичного молочного сырья [1].

Витамины, мг%	Тиамин (В ₁)	Рибофлавин (В ₂)	Пиридоксин (В ₆)	Кобаломин (В ₁₂)	Аскорбиновая кислота (С)	Ретинол (А)	Токоферол (Е)	Биотин (Н)	Холин
Цельное молоко	0,45	1,50	0,33	4,00	1,50	0,25	0,85	56,00	313,00
Обезжиренное молоко	0,35	1,8	1,50	4,00	2,30	0,03	0,50	0,01	328,00
Пахта	0,36	2,00	1,60	4,20	2,70	0,08	0,55	0,01	466,00
Молочная сыворотка	0,37	2,00	1,30	2,60	4,70	0,04	0,29	0,01	662,0

Следует учитывать, что содержание жирорастворимых витаминов, таких как А, D, Е, во вторичном сырье значительно ниже исходного их содержания в молоке. Однако, содержание некоторых витаминов группы В напротив значительно превышает исходное содержание, что обусловлено деятельностью молочнокислых бактерий [11 - 17].

Таким образом, по своему составу вторичное молочное сырье – пахта, молочная сыворотка и обезжиренное молоко – это полноценное пищевое сырье, обладающее значительной биологической ценностью и при этом диетическое. Энергетическая ценность такого сырья ниже ценности исходного молока более чем в 2 раза.

Таблица 1.3. Энергетическая ценность молочного сырья [1].

Сырье	Энергетическая ценность	
	кДж	%
Цельное молоко	2805	100
Обезжиренное молоко	1440	51
Пахта	1599	58
Молочная сыворотка	1013	36

Однако, говоря об использовании вторичного молочного сырья, следует учитывать разность физико-химических свойств по сравнению с цельным молоком. Так, во вторичном сырье содержание влаги значительно выше, чем в молоке. Кроме того, вода во вторичном сырье связана с сухими компонентами иными, более энергоемкими связями, что снижает эффективность процессов сушки и выпаривания. А низкая степень перехода в сыворотку и пахту жира обуславливает меньшие их плотность и вязкость, в сравнении с цельным молоком.

Таблица 1.4 . Некоторые физические и химические свойства молочного сырья [1].

Сырье	Плотность, кг/м ³	Вязкость, Па·с·10 ⁻³	Теплоем- кость, кДж/кг·К	Поверх. натяжение, Па·с	Кислотность	
					Титруе- мая, °Т	Актив- ная, (рН), ед.
Цельное молоко	1027–1032	1,30–2,20	3,90	49	16–18	6,7–6,5
Обезжиренное молоко	1029–1035	1,71–1,75	3,98	53	16–20	6,5–5,7
Пахта	1027–1035	1,65	3,94	40	15–50	6,6–4,9
Молочная сыворотка	1022–1027	1,55–1,65	4,80	52	13–75	6,5–4,5

Важно при использовании вторичного молочного сырья учитывать необходимость его охлаждения, т.к. в процессе производства в такое сырье попадает значительное количество молочнокислых бактерий, а нагрев сырья в технологическом цикле приводит к созданию оптимальных условий для их жизнедеятельности.

Процессы брожения могут привести к образованию молочной кислоты,

что, в свою очередь, увеличивает кислотность и приводит к потере лактозы. А гидролиз белков и жиров приводит не только к изменению вкуса сырья, но и к накоплению вредных веществ. Поэтому рекомендуется использование вторичного сырья и, в первую очередь, молочной сыворотки в первые часы после получения. В противном случае сыворотку необходимо подвергать тепловой обработке или консервированию.

Наиболее известные направления переработки вторичного молочного сырья это: комплексное использование для производства напитков и сгущенных продуктов, использование отдельных компонентов (например, извлечение белка) [13] и получение производных от компонентов сырья (например, этилового спирта).

Исходя из исходного промышленного процесса получения вторичного молочного сырья, его разделяют на обезжиренное молоко, пахту и молочную сыворотку.

Обезжиренное молоко, как правило, используют для получения молочных продуктов для непосредственного употребления. Примерами таких продуктов могут служить кисломолочные и белковые нежирные напитки, некоторые сыры и заменители молока. Кроме того из обезжиренного молока получают медицинские препараты и корма для животных. Перспективным является направление получения из обезжиренного молока отдельных компонентов – казеина и белка. В этой области разработки велись проф. П.Ф. Дьяченко [18].

Пахта отличается повышенным содержанием жира и биологически активных веществ по сравнению с обезжиренным молоком. Из пахты получают более 50 наименований продуктов питания, среди которых различные кисломолочные и свежие напитки, мороженое. Пахту используют для нормализации молока по жиру, а также для получения сгущенных продуктов. Разработками в области переработки пахты занимается проф. Ф.А. Вышемирский [19, 20].

Молочная сыворотка обладает не менее обширной сферой применения.

Получаемая при производстве сыров, творога или казеина, молочная сыворотка подходит для производства отдельных ее компонентов, пищевых продуктов для непосредственного употребления и пищевых продуктов, пригодных для длительного хранения. В ассортименте таких продуктов более 1000 наименований. Одним из наиболее перспективных считается путь получения сухого концентрированного сывороточного белка, который хорошо хранится и используется в производстве большого количества пищевых продуктов, в том числе детского питания [21 - 23].

1.2 Классические методы разделения растворов молочных производств

После получения, для предотвращения развития процессов брожения, вторичное молочное сырье необходимо подвергнуть обработке одним из способов, рассмотренных ниже [24 - 28].

1.2.1 Тепловые методы

Охлаждение

Как правило, если переработка сырья задерживается, то сдерживание нежелательных процессов брожения производят охлаждением сырья, и в частности – сыворотки. Такая обработка подходит, главным образом для временного хранения.

Охлаждают сыворотку непосредственно после ее получения, не допуская попадания в нее посторонней микрофлоры. Используют для этого процесса различные холодильные установки. Ключевым фактором является скорость охлаждения. Однако наиболее эффективно сочетание процессов пастеризации и охлаждения.

Пастеризация

Попадание посторонней микрофлоры в сыворотку, а также переход в нее молочнокислых бактерий из заквасок, вносимых на стадии производства основного продукта, обуславливают необходимость пастеризации молочной

сыворотки. Кроме того, пастеризация необходима для подавления активности сычужных ферментов, также вносимых на стадии производства основного продукта.

В связи с образованием накипи на оборудовании, при нагревании сыворотки до температур денатурации белков, принято использовать трубчатые установки для пастеризации. Различают два режима пастеризации молочной сыворотки – медленный и быстрый. При медленной пастеризации нагрев осуществляют до температуры 60 – 65 °С и выдерживают сыворотку при такой температуре 30 минут. Этот режим требует значительных затрат времени, а также наличия свободных емкостей для выдержки. Быстрый режим подразумевает более интенсивное нагревание (до 72 °С), но при этом выдержка не превышает 20 секунд. Однако при таком режиме на оборудовании интенсивно образуется пригар.

Коагуляция сывороточных белков

Существует множество способов выделения белков из сыворотки. Среди них реакции с комплексонами, адсорбция, ультрафильтрация, тепловая денатурация и другие.

Наиболее распространенным и изученным способом сегодня является тепловая денатурация, проводимая с изменением реакции среды. Однако большие перспективы имеют способы мембранного разделения (ультрафильтрация) и сорбции.

Исходное состояние частиц белка в молочной сыворотке – нативное. Денатурация белка направлена на изменение этого состояния – разрушение структуры белка. При разрыве 10 – 20 % связей глобула теряет устойчивость, разворачивается, изменяя конфигурацию частиц [1, 2].

Для достижения такого состояния возможно использование различных путей денатурации. Среди них механическое воздействие, нагревание, введение окислителей, изменение реакции среды и многие другие. Все способы ведут к одному результату – разрыв внутримолекулярных связей и разворачивание глобул белка. Затем в результате ассоциации и химических

процессов происходит выделение белка, наиболее близкое по структуре к процессу коагуляции. Затем коагуляцию закрепляют, предотвращая возвращение белка в нативное состояние. Этому способствует введение кислот и щелочей, которые разрыхляют солевые связи.

1.2.2 Центробежные методы

Сепарирование

В процессах осветления (отделение предварительно скоагулированных белков) и обезжиривания (отделение молочного жира) принято использовать сепарирование. Процессы отделения жира и белков могут осуществляться как для повышения качества производимого продукта, так и иметь самоцелью получение этих веществ в чистом виде, что связано с их высокой энергетической и биологической ценностью и возможностью их использования в пищевых целях.

При производстве сычужных сыров, часть жира переходит в сыворотку. Количество перешедшего жира сильно колеблется в зависимости от того или иного технологического процесса. Содержание таких жиров в сыворотке, как правило, составляет 0,2 - 0,6 % [19]. При этом частицы жира распределяются таким образом, что основная часть жира находится в виде шариков диаметром 2 – 6 мкм. При нарушении технологического процесса в сыворотку отходит повышенный объем жира, что негативно сказывается на качестве получаемого продукта.

Кроме жировых частиц в сыворотке также содержится казеиновая пыль. Она составляет примерно 0,4 % сыворотки и извлекается фильтрацией, центрифугированием или отстаиванием. Отстаивание проводится в течение 2 – 3 часов, что требует дополнительных объемов емкостей и способствует изменениям в сыворотке в результате брожения. А использование фильтрации осложнено тем, что частицы казеиновой пыли забивают поры фильтров [2]. Поэтому, наиболее эффективным способом остается

центрифугирование. Время проведения этого процесса составляет всего 30 секунд.

Наибольшее применение при отделении жира и казеиновой пыли из сыворотки нашли сепараторы комбинированного типа, в которых имеется два типа тарелок (осветлительные и разделительные), между которыми размещается межсекционная тарелка. Это сепараторы периодического типа. Возможно и применение сепараторов для молока, но при условии снижения их производительности на 20 %.

Очистка сыворотки от хлопьев белка

Коагуляция сывороточных белков приводит к получению суспензии. Крупные хлопья белка взвешены в сыворотке. При этом различные способы коагуляции приводят к получению различного количества взвешенных частиц. Сравнение некоторых таких способов приведено в таблице.

Таблица 1.5. Сравнительная эффективность способов коагуляции [1].

Способ коагуляции (после тепловой денатурации)	Содержание взвешенного осадка, мг/л	
	Пределы Колебаний	Среднее значение
Кислотный	$54 \cdot 10^2 - 76 \cdot 10^2$	$66 \cdot 10^2$
Кислотно-щелочной	$76 \cdot 10^2 - 99 \cdot 10^2$	$86 \cdot 10^2$

Как видно из таблицы 1.5, разница в количестве получаемого осадка в зависимости от способа коагуляции весьма значительна и может достигать 20 %.

В процессе центрифугирования на хлопья белка оказывается механическое воздействие, что приводит к увеличению их дисперсности в осадке, по сравнению со взвешенным состоянием.

Плотность молочной сыворотки при 20 °С колеблется в пределах 1022 – 1026 кг/м³. При нагревании до температуры денатурации и очистке от белка плотность сыворотки значительно снижается – до 1005 кг/м³. А

плотность образовавшихся хлопьев белка равна 1045 – 1060 кг/м³ (влажность осадка 80 – 86 %).

Как уже отмечалось, суспензию белковых хлопьев в сыворотке можно разделить несколькими способами – отстаивание, фильтрация и центрифугирование.

Процесс отстаивания происходит за счет разности плотностей дисперсной фазы и дисперсионной среды. Зная величину средней скорости оседания можно определить продолжительность отстаивания:

$$\tau = H/v, \quad (1.1)$$

где τ - время отстоя, с; H - высота отстойника, м; v - скорость оседания частиц, м/с.

После отстаивания верхний осветленный слой сыворотки сливается и остается так называемое альбуминовое молоко – масса отстоявшегося белка (содержание белка достигает 5 %).

Метод отстаивания получил широкое распространение в производстве молочного сахара, однако к его недостаткам относится низкая эффективность (80 – 85 %), потеря сыворотки с осадком, длительность и необходимость больших объемов емкостного оборудования. Поэтому этот метод следует применять лишь как предварительный.

А.А. Розанов предложил и испытал фильтрацию сыворотки [2]. При этом использовалась фильтровальная ткань с наполнителем – диатомитом. Полученные характеристики метода приведены в таблице 1.6.

Таблица 1.6. Способы фильтрации [1, 2].

Способ фильтрации	Средняя скорость фильтрации л/(мин·м ²)	Эффективность удаления взвешенного осадка, %
Без предварительного отстоя	0,3	77
То же, с наполнителем	1	90
С предварительным отстоем	2,2	88
То же, с наполнителем	5	94

Применение фильтрации без наполнителей или без предварительного отстаивания нецелесообразно, т.к. белковый осадок обладает высокой сжимаемостью.

Профессор М.С. Коваленко описал теоретически способ центрифугирования сыворотки с целью отделения белка [2]. Разделяемость суспензии для этого способа определяется по формуле

$$E = (\rho_1 - \rho_2) d / (18\eta), \quad (1.2)$$

где E - разделяемость системы, усл. ед.; $\rho_1 - \rho_2$ - разность плотностей дисперсной фазы и дисперсионной среды, кг/м³; d - эквивалентный размер наименьшей частицы, подлежащей выделению, м⁻²; η - вязкость дисперсионной среды, Па · с.

Так как размер частиц непостоянен и хлопья склонны к агрегации, можем записать

$$(\rho_1 - \rho_2) d / \eta = (1,056/n^2 \tau) \lg (R/r), \quad (1.3)$$

где n — частота вращения, с; R и r - расстояние выделяемой частицы от оси вращения в начале опыта и через промежуток времени τ , см.

Используя уравнения (1.3) и (1.2) можно записать следующим образом:

$$E = (1,056/18n^2 \tau) \lg (R/r), \quad (1.4).$$

Значения R , r , τ определяются экспериментально, центрифугируя сыворотку после коагуляции белков.

Величины разделяемости для различных методов коагуляции колеблются в пределах $0,1 \cdot 10^{-7} - 4 \cdot 10^{-7}$. При этом фактор разделения современных сепараторов значительно превышает эту величину, а значит, применение центробежного метода возможно. Сравнительные характеристики различных методов отделения белка представлены в таблице 1.7.

Таблица 1.7. Сравнительные характеристики различных методов отделения белка [1].

Сыворотка	Способ очистки	Содержание белка, %	Удалено белка, %	Мутность 1/см	Снижение мутности, раз
Исходная	-	0,84	-	0,158	-
	Отстой в течение 1,5 ч	0,43	49	0,01	15,8
Очищенная	Сепарирование на молокоочистителе	0,315	62,5	0,005	31,6
	Фильтрация через ткань	0,32	62	0,006	26,3
	через бумагу (контроль)	0,31	63,5	0,003	52,6

Из приведенных данных следует, что центробежный метод наиболее эффективен. Осуществляется такой метод в промышленности в сепараторах с механическим отделением осадка.

1.2.3 Консервирование

Консервирование позволяет наиболее просто и дешево сохранить сыворотку, предотвратить разложение входящих в ее состав компонентов и предотвратить изменение вкуса, запаха, а также сохранить исходную энергетическую и биологическую ценность.

Достигается такой эффект за счет подавления микроорганизмов, вызывающих брожение сыворотки, а также за счет снижения скоростей реакций, вызванных ферментами.

Наиболее популярные способы консервирования, применяемые для сохранения молочной сыворотки в различных комбинациях – сгущение, охлаждение и введение консервантов. Выбор конкретного метода или сочетания методов зависит от получаемого продукта.

Сгущение и сушка

Решить вопрос сохранности сырья, при этом еще и значительно снизив его объем, позволяют методы сгущения и сушки. При сгущении молочной сыворотки повышается осмотическое давление и происходит увеличение концентрации молочной кислоты, что, в конечном счете, вызывает консервирующий эффект. Осмотическое давление в натуральной молочной сыворотке равно 0,74 МПа, что вполне комфортно для жизнедеятельности микроорганизмов, обладающих внутриклеточным давлением 0,6 МПа. Однако при сгущении сыворотки хотя бы в 5 раз, осмотическое давление повышается в 10 раз, и создаются условия неблагоприятные для деятельности микроорганизмов, вызывающих порчу сыворотки. Кроме того, повышение температуры сыворотки до 65 °С в процессе ее сгущения обеспечивает пастеризацию сырья, а накопление молочной кислоты повышает кислотность до 100 °Т, также оказывая неблагоприятное воздействие на микроорганизмы [27, 29 - 31].

Сгущение сыворотки в 10 раз способствует увеличению срока ее хранения до 60 суток при температуре 2 – 5 °С, или до 5 - 30 суток при более высоких температурах.

В некоторых технологических процессах, например при производстве сыров, предусмотрено внесение дополнительной соли NaCl для подсолки сыра. Переходя в сыворотку, эта соль значительно повышает осмотическое давление (до 2 МПа) и оказывает подавляющее действие на микроорганизмы, тем самым снижая необходимую степень концентрирования сырья. Однако следует не допускать вторичного обсеменения сгущенной сыворотки, т.к. возможна адаптация микроорганизмов к новым условиям.

Сушка сыворотки и вовсе позволяет сохранять готовый продукт от 6 мес. и более, т.к. в сухой сыворотке условия для развития микроорганизмов крайне неблагоприятные.

И тот и другой способы представляют собой, по сути, удаление воды из сыворотки. Такое концентрирование возможно проводить различными

методами – выпариванием, гиперфильтрацией или вымораживанием. Процесс выпаривания при температуре кипения раствора на практике и называют сгущением. Вымораживание интересно с точки зрения энергосбережения. А наиболее перспективные на сегодня методы – обратный осмос (гиперфильтрация), электродиализ и ультрафильтрация [32 - 38].

1.2.4 Биологические методы обогащения молочной сыворотки

Помимо использования уже имеющихся в сыворотке ценных компонентов, возможно ее биологическое обогащение различными путями. Так, введение в сыворотку дрожжей, питающихся лактозой, способствует синтезу в ней белков. Кроме того, известны способы ферментации лактозы до моноз, синтез витаминов, жиров, молочной кислоты и этилового спирта.

1.2.5 Мембранные методы обработки

Различные методы мембранного концентрирования и разделения растворов – микрофильтрация, ультрафильтрация, обратный осмос, электродиализ, ионный обмен – применимы и для целей переработки вторичного молочного сырья в ценные конечные продукты. Это обусловлено тем, что, по сути, молочная сыворотка – это гетерогенная система, в которой четко выражена дифференциация ее компонентов по размеру частиц.

Многие ученые, начиная с академика Н.Н. Липатова и заканчивая многими современными исследователями [1, 2, 32 - 38], подчеркивают перспективность мембранных методов переработки молочного сырья и ведут разработки в этой сфере.

Согласно современным наработкам, наибольший интерес в практическом плане вызывают процессы электродиализа, сорбции, ультрафильтрации и обратного осмоса [39 - 50].

Однако у мембранных процессов есть свои недостатки и сложности, связанные с организацией процесса. Большое негативное влияние на процессы мембранного разделения оказывает эффект концентрационной поляризации – образование слоя с высокой концентрацией выделяемого

компонента непосредственно на поверхности мембраны. Такой слой препятствует движению растворителя через мембрану и снижает эффективность разделения [40, 51 - 60].

Несмотря на недостатки, изучение мембранных методов продолжается, благодаря тому, что они обеспечивают возможность регулирования состава и свойств продукта, требуют сравнительно небольших затрат энергии, позволяют создавать новые продукты и способствуют рациональному использованию вторичного молочного сырья [25, 26, 61 – 68].

1.3 Электро- и баромембранные методы разделения растворов

1.3.1 Микрофльтрация

Этот метод применим для разделения крупнодисперсных систем – суспензий и коллоидных растворов. Величина пор мембран для микрофльтрации составляет 0,1 – 1 мкм. Таким образом, этот метод позволяет производить стерилизацию молочной сыворотки без нагревания, а также отделять остаточный молочный жир [52, 69].

1.3.2 Ультрафльтрация

В процессах ультрафльтрации внешнее давление, приложенное к системе, превышает осмотическое, а величина пор мембраны позволяет извлекать из растворов высокомолекулярные соединения. Величина пор в таких мембранах попадает в диапазон от 10 до 100 нм. Как правило, молекулярная масса задерживаемых ультрафльтрацией компонентов превышает 10⁴ ед. [70].

Значительный диаметр пор ультрафльтрационных мембран позволяет при ультрафльтрации молочной сыворотки задерживать крупные частицы белка, в то время как компоненты, образующие «истинный» раствор – минеральные соли и лактоза – проходят сквозь поры мембран в фильтрат. Витамины же остаются в концентрате. Таким образом, ультрафльтрация позволяет отделить от концентрата примерно 30 % кальция и 50 % фосфора.

А степень отделения таких веществ как магний, хлор и калия составляет 70 – 90 %. Процесс протекает при наложении давления 0,1 – 1 МПа.

При правильном соблюдении технологического режима процесса ультрафильтрации молочной сыворотки, состав концентрата молочных белков соответствует данным, приведенным в таблице 1.8.

Таблица 1.8. Состав концентрата молочных белков [1, 2].

Продукт	Содержание, %					
	Сухих веществ	Белка	Лактозы	Минеральных солей	Молочной кислоты	Воды
Исходная сыворотка	6,5	0,7	4,5	0,6	0,6	93,5
Концентрат	18	12,5	4,5	0,6	0,6	82

Таблица 1.9. Состав фильтрата [1].

Показатель	Фильтрат	
	Подсырной сыворотки	Творожной сыворотки
Сухие вещества, %	5,1 – 5,4	5,2 – 5,6
Лактоза	4,2 – 4,8	4,2 – 4,8
Белок	0,2 – 0,24	0,20 – 0,24
Зола	0,5 – 0,75	0,6 – 0,9
Макроэлементы, мг %		
Кальций	55 – 70	85 – 120
Фосфор	40 – 65	65 – 80
Калий	120 – 180	150 – 280
Натрий	61 – 90	45 – 75
Микроэлементы, мг на 100 г		
Медь	2,7 – 4	–
Цинк	11,5 – 20,5	–
Железо	63 – 80	–
Марганец	5,2 – 5,5	4,6 – 4,8
pH	5,2 – 5,8	4,7 – 5,1
Титруемая кислотность, °Т	8 – 18	80 – 100
Плотность, кг/м ³	1012 – 1018	1016 – 1018
Вязкость, Па·с	1,135 – 1,15	1,130 – 1,155

Состав фильтрата (табл. 1.9) зависит от вида исходной сыворотки.

Существуют определенные сложности проведения процесса. Так, по причине того, что молочное сырье легко поддается брожению, к воде для промывки оборудования предъявляются особые требования чистоты [52, 71 - 79].

Концентраты, полученные при ультрафильтрации, могут подвергаться повторной обработке, путем разбавления чистой водой и подачи на ультрафильтрацию. Таким образом, вымываются остаточные низкомолекулярные и минеральные соединения. Такой процесс называют диафильтрацией.

1.3.3 Обратный осмос

Процесс обратного осмоса схож с ультрафильтрацией. Здесь также преодолевается осмотическое давление раствора за счет наложения внешнего давления. Однако из-за меньшей величины пор при обратном осмосе внешнее давление выше, чем при ультрафильтрации. По той же причине, при обратном осмосе концентрируются почти все компоненты молочной сыворотки, и отделяется чистый растворитель, что несколько менее выгодно по сравнению с концентрированием белка в процессе ультрафильтрации, с практической точки зрения. Обратный осмос, по сути, сводится к сгущению молочной сыворотки, путем извлечения избытка растворителя.

Так как минеральные вещества также задерживаются мембраной, а осмотическое давление растворов минеральных веществ значительно выше осмотического давления растворов высокомолекулярных соединений, то и давление, необходимое для предотвращения осмотического, в случае обратного осмоса значительно выше, чем в случае ультрафильтрации. Величина рабочего давления в этих процессах превышает 10 МПа. Диаметр пор обратноосмотических мембран составляет 1 – 10 нм. В процессах обратного осмоса задерживаются практически все вещества молекулярной массой от 50 ед. Как и другие мембранные методы, обратный осмос не

требует нагревания разделяемого раствора и потому энергетически несколько выгоднее других традиционных способов сгущения, требующих изменения температуры сыворотки.

Поэтому обратноосмотическая обработка молочного сырья нашла определенное применение в промышленности. Во Франции существуют предприятия, обрабатывающие 80 т сыворотки в сутки, получая, таким образом, 20 т концентрата и 60 т чистой воды [1].

Также за рубежом имеется хороший опыт совмещения ультрафильтрации и обратного осмоса. Отделив концентрат белка в процессе ультрафильтрации, можно направить фильтрат на стадию обратного осмоса с получением концентрата лактозы и воды. Как показывает практика, мембранные методы позволяют сконцентрировать сухие молочное сырье до содержания сухих веществ 20 – 30 %.

Оптимальные данные для промышленного процесса обратного осмоса приведены в таблице 1.10.

Таблица 1.10. Оптимальные данные для промышленного процесса обратного осмоса [1, 2].

Показатель	Творожная сыворотка	Концентрат	фильтрат
Массовая доля сухих веществ, %	5,69	22,7	0,2 – 0,3
В том числе			
Белка	0,89	0,8	Нет
Лактозы	17,2	–	0,13 – 0,2
Золы	0,4 – 0,5	1,2	0,1
Жиры	0,1	Нет	Нет

Как видно из таблицы, в фильтрат попадает немного минеральных солей и лактозы. Концентрирование молочного сырья обратным осмосом имеет ряд сложностей. К ним относится осаждение на мембране высокомолекулярных соединений, например белков, а также наличие слоя солей и лактозы. Устранение такого белкового осадка с мембранного

оборудования требует специальных операций. А наличие этих отложений значительно снижает производительность оборудования. С течением времени между молекулами осадка образуются прочные связи, и удалить его становится еще более проблематично.

Для промывки мембранного оборудования применяются специальные ферментные растворы, нагревание, а также обратный ток фильтрата. Дезинфекцию проводят растворами хлора. После чистки выполняют промывку водой в течение нескольких часов.

1.3.4 Электродиализ

Применение электродиализа способствует эффективной деминерализации молочной сыворотки. Под действием электрического поля полупроницаемая мембрана пропускает только ионы одного знака, задерживая ионы противоположного заряда. Используя две мембраны – катионитовую и анионитовую – можно выделить из сыворотки минеральные вещества. Катионы минеральных веществ извлекаются со стороны катода через катионитовую мембрану, а анионы, двигаясь к аноду, удаляются через анионитовую мембрану. В результате этих процессов сыворотка обессоливается. Так как молекулы белков и лактозы электронейтральны, то в результате процесса электродиализа их концентрация не изменяется [36, 80 - 85].

В первую очередь из сыворотки удаляются одновалентные ионы. Следует отметить, что именно одновалентные хлор, натрий и калий наиболее сильно изменяют вкус молочного сырья. Что же касается содержания микроэлементов, то эксперименты показали, что цинк, железо, медь и др. микроэлементы не извлекаются электродиализом [68].

Эксперименты с электродиализом молочной сыворотки показали, что возможно достижение 90 % уровня деминерализации. При этом не происходит изменения рН. Наибольшая степень извлечения соответствует ионам хлора, калия и натрия. В процессе электродиализа качество белков

сыворотки, витаминов и лактозы не снижается. Имеют место незначительные потери белка (в диапазоне 2 – 3 %). Для лактозы величина потерь несколько больше – 6 %. Значительно улучшается вкус и другие органолептические свойства сыворотки [39, 68].

Таблица 1.11. Содержание микроэлементов в молочной сыворотке при различной минерализации, мг % [1, 2].

Уровень деминерализации сыворотки, %	Микроэлементы, мг %			
	железо	медь	цинк	марганец
0	1,69	0,24	0,51	0,09
51	0,91	0,3	1,73	0,1
74	2,01	0,33	1,72	0,1
90	0,81	0,26	1,74	0,06

Таблица 1.12. Характеристики творожной сыворотки при различных уровнях деминерализации [1].

Уровень деминерализации, %	Массовая доля веществ, %		Кислотность, °Т	Степень раскисления	рН	Удельная электропроводимость, Ом/м
	сухих	минеральных				
0	5,70±0,38	0,65±0,06	58±5	0	4,44±0,13	0,74±0,06
30	5,36±0,36	0,45±0,05	50±5	14	4,49±0,13	0,55±0,05
50	5,16±0,34	0,32±0,04	42±4	27	4,50±0,13	0,42±0,04
70	4,13±0,34	0,20±0,03	31±3	46	4,45±0,13	0,24±0,02
90	4,73±0,34	0,07±0,01	18±2	69	4,39±0,13	0,17±0,01

Наиболее выгодны процессы деминерализации сыворотки, уже подвергшейся предварительной обработке. Сначала традиционными способами очищают сыворотку от казеиновой пыли и молочного жира. При такой предварительной обработке затраты на деминерализацию значительно сокращаются на 30 %. Скорость обессоливания сыворотки также выше в случае ее предварительного сгущения.

Важно отметить, что экономически электродиализ до уровня деминерализации 90 % не выгоден. Этот процесс остается экономически эффективным лишь до уровня 70 %. Дальнейшее увеличение степени деминерализации, по данным Французских переработчиков, приводит к значительному повышению расхода сыворотки. Обессоливание же до уровней выше 70 % эффективно другими способами. Один из них – использование ионообменных смол.

Тем не менее, ассортимент продукции, производимой из концентратов, обессоленных методом электродиализа, достаточно широк [1, 39]. Это и заменители женского молока, добавки к кондитерским изделиям, мороженое, добавки к диетическим продуктам, сырье для парфюмерной промышленности и другие.

Актуальной сферой для исследований является объединение методов ультрафильтрации и электродиализа. Таким способом получают деминерализованный белковый концентрат. Пока максимальное содержание белка в концентрате составляет 35 %, однако исследования продолжаются. Примерное значение энергозатрат на получение 1 кг деминерализованной сыворотки составляет 10 – 30 кВт·ч.

1.3.5 Гельфильтрация

Этот метод позволяет разделять сложные системы на молекулярном уровне, при помощи так называемых молекулярных сит – гидрофильных гелей. Такие гели имеют структуру подобную сеткам и набухают в воде и водных растворах. При этом они подходят как для разделения электронейтральных, так и заряженных веществ, благодаря своей неионной структуре.

Проходя с потоком растворителя через слой геля, набухшего в воде, мелкие молекулы попадают в поры, а крупные – проходят сквозь слой. Таким образом, происходит разделение вещества на выходе – сначала выходят крупные молекулы, затем средние, затем более мелкие. Применительно к

молочной сыворотке это означает, что в результате гельфильтрации сначала выходят белки, затем лактоза и затем минеральные вещества.

Как показали эксперименты, белковая фракция при гельфильтрации отделяется практически в чистом виде, а фракции лактозы и минеральных солей выходят с некоторым наложением друг на друга. Содержание белка в сывороточном концентрате, получаемом гельфильтрацией, составляет от 40 до 80 %. На основе полученных концентратов в настоящее время выпускают промышленно различные белковые продукты.

Недостатком метода является необходимость использования ряда дополнительных операций, что приводит к увеличению стоимости переработки. Как правило, требуется предварительное и заключительное сгущение.

Таблица 1.13. Химический состав промышленных белковых концентратов, полученных с помощью гельфильтрации [1, 2].

Химический состав	Енр-Про 50	Енр-Экс	Енр-Ро
Белок (N×6,38), %	54,2	18,0	15,8
Лактоза, %	24,6	40,6	36,5
Зола, %	14,0	25,6	33,9
Вода, %	3,1	2,2	2,5
Жир, %	2,0	0,1	1,3
Лактат, %	3,3	7,7	4,0
Цитрат, %	1,7	4,5	3,0
pH (3%-ный раствор)	7,2	7,3	6,9
Энергетическая ценность, кДж/100 г	1478,0	1214,0	1084,0

К молочной сыворотке, поступающей на гельфильтрацию, предъявляются требования по вязкости 2,3 – 2,5 мПа·с. Необходимо предварительное удаление из сыворотки молочного сахара.

Промышленное применение гельфильтрации все же не нашло широкого применения. Главной причиной этого является дороговизна метода. В Швеции имеется установка, перерабатывающая 3,7 т сыворотки в

час в 75 % концентрат. Установка содержит стадию предварительной очистки и сгущения сыворотки, а также ее охлаждения. Затем сыворотка подвергается фильтрации, нагревается и только потом поступает на гель.

Белковая фракция затем сгущается и сушится распылительным методом. Итоговый выход конечного продукта составляет 28 кг/ч.

1.3.6 Сорбция – десорбция

Так как целью переработки вторичного молочного сырья является извлечение из него ценных компонентов, вполне естественно, что одним из методов, позволяющим реализовать такое извлечение, является метод сорбции. В качестве сорбентов, извлекающих белковые соединения, использую различные природные сорбенты и синтетические смолы.

В случае молочной сыворотки, извлечение полезных компонентов происходит при помощи поверхности сорбента. Иными словами, идет процесс адсорбции. После адсорбции, белковые вещества извлекают с поверхности сорбента [86 - 88].

Наибольшее распространение сорбционные процессы нашли в промышленном производстве молочного сахара, а также в некоторых анализах. Однако разработаны и процессы, позволяющие получать в чистом виде белки. Для этих процессор разработаны специализированные сорбенты. Однако следует учитывать, что процесс десорбции приводит к получению раствора целевого продукта, который по-прежнему требует концентрирования и сушки. Хотя продукт в конечном счете получается очень чистым, необходимость проведения операций сорбции-десорбции и затем еще и концентрирования (ультрафильтрацией), а также распылительной сушки, существенно удорожает производство. Кроме того, при реализации процесса, остаются вопросы необходимости больших объемов воды, а также рационального использования элюата. Несомненным достоинством процессов сорбции-десорбции является высокие показатели срока службы

сорбентов. Эксперименты показали, что некоторые из них могут работать без каких-либо изменений структуры и свойств порядка двух лет.

1.3.7 Ионный обмен

Ионный обмен позволяет регулировать солевой и кислотный состав молочного сырья, сохраняя его и улучшая свойства. При взаимодействии с молочной сывороткой, ионообменные смолы способны производить обмен ионов – нежелательные ионы из сыворотки связываются смолами, в то время как в сыворотку из смолы переходят другие, менее вредные, ионы.

Сыворотку сначала обрабатывают катионитами, которые связывают катионы минеральных примесей, насыщая ее кислотами. Затем сыворотку обрабатывают анионитами, которые в свою очередь связывают анионы образовавшихся на предыдущем этапе кислот.

Ионитами могут выступать как природные, так и синтетические электролиты. Они, как правило, имеют жесткую матрицу, связанную химически с функциональными группами.

Деминерализация сыворотки этим способом дает эффективность более 90 %, а иногда 99%. В случае необходимости меньшей степени деминерализации, используют разбавление исходной сывороткой.

При промышленной реализации следует учитывать необходимость регенерации ионитов после каждого цикла. Для этого необходимо использование реагентов, а также наличие параллельной производственной линии для избегания простоя на время регенерации.

Недостатком метода можно назвать введение в продукт большого числа посторонних ионов, способных значительно изменять свойства и минеральный состав сыворотки.

1.4 Математические модели, используемые для описания кинетики мембранного разделения растворов

Существуют различные уравнения переноса растворенных веществ и растворителей через полупроницаемую мембрану. Эти уравнения позволяют производить анализ массопереноса в мембранных процессах, а также разрабатывать математические модели процессов и методики их расчета. Уравнения переноса записываются отдельно для жидкой среды и для материала мембраны. При этом если процесс протекает с наложением электрического поля (электроультрафилтрация или электроосмофилтрация), то в дополнение к уравнениям массопереноса необходимо записывать уравнения теплопереноса, т.к. прохождение электрического тока через раствор и элементы мембранного аппарата вызывает выделение тепла и разогрев аппарата и разделяемого раствора.

Наиболее часто используются модель капиллярно-пористого строения мембраны, модель растворения-диффузии в мембране и термодинамическая модель, которая основывается на термодинамических уравнениях необратимых процессов [89 - 101].

Рассмотрим кратко эти модели.

1.4.1. Капиллярно-пористая модель

Капиллярно-пористая модель предполагает, что в мембране существуют поры различного размера. Одни поры имеют размер, достаточный только для прохождения молекул растворителя, а другие – способны пропускать и гидратированные ионы растворенных веществ [55].

Предположим, что поры мембран имеют прямую цилиндрическую форму. Тогда уравнения, описывающие потоки растворителя и растворенного вещества через мембрану примут вид:

$$J_v = \frac{\pi \sum_0^{\infty} n_i r_i^4}{8\mu} \frac{\Delta P}{\ell_M}; \quad (1.5)$$

$$J_s = \frac{\pi \sum_0^{\infty} n_i r_i^4}{8\mu} \frac{\Delta P}{\ell_M}; \quad (1.6)$$

где J_V, J_S - суммарный поток жидкости и, соответственно, поток растворенного вещества; n_i - число пор радиуса r_i , на единицу поверхности; ΔP - перепад давления; ℓ_M - толщина мембраны; μ - вязкость. В формулы (1.7) и (1.8) также вводятся пористость и извилистость пор [74].

1.4.2. Модель растворения-диффузии

При переносе веществ через мембрану в качестве движущей силы процесса выступает градиент физико-химического потенциала в мембране $\nabla \bar{\mu}_i$. Этот потенциал есть сумма потенциалов химического μ_i и физического Φ_i [89]:

$$\bar{\mu}_i = \mu_i + \Phi_i \quad (1.7)$$

При этом химический потенциал рассчитывается как:

$$\mu_i = \mu_i^0 + v_i P + RT \ln a \quad (1.8)$$

где μ_i^0 стандартный химический потенциал; a — коэффициент активности; v_i - парциальный мольный объем растворенного вещества в мембране; P - внешнее давление; T - температура; R - универсальная газовая постоянная.

Потенциал i -го компонента в растворе в поле действия физических сил – физический потенциал Φ_i . При этом в качестве физических сил могут выступать гравитационные, электрические и другие силы.

В случае переноса заряженных частиц, следует учитывать также влияние электрических полей, налагаемых извне и создаваемых самими частицами.

$$\Phi_i = z_i F \varphi \quad (1.9)$$

где z_i - заряд иона; φ - электрический потенциал; F - число Фарадея.

Поток электролита можно рассчитать по уравнению:

$$\bar{J}_i = -\bar{D}_i (\nabla \bar{c}_i + \bar{c}_i \nabla \ln \bar{\gamma}_i) + \bar{c}_i W \quad (1.10)$$

Это уравнение записано для фазы мембраны. В более узких областях можно использовать частные виды этого уравнения.

Например, уравнение Нернста-Планка применяется для описания массопереноса в растворах и мембранах [89]:

$$\bar{J}_i = -\bar{D}_i \left(\nabla \bar{c}_i + z_i \bar{c}_i \frac{F}{RT} \nabla \varphi + \bar{c}_i \nabla \ln \gamma_i \right) + \bar{c}_i W \quad (1.11)$$

Уравнение (13) можно дополнить уравнением электронейтральности

$$\sum z_i c_i + \omega X = 0 \quad (1.12)$$

и выражением для плотности тока

$$i = F \sum_i z_i \left[-\bar{D}_i \left(\nabla \bar{c}_i + \bar{c}_i \nabla \ln \gamma_i \right) - \bar{D}_i \bar{c}_i \frac{z_i F}{RT} \nabla \varphi + \bar{c}_i W \right] \quad (1.13)$$

В уравнениях (1.13 – 1.15): X - концентрация фиксированных ионов в мембране; ω - знак заряда фиксированных ионов; W - скорость течения жидкости в направлении приложенного поля; i - плотность тока.

В литературе [74] встречаются записи потоков каждого компонента выражениями вида:

$$J_i = -\frac{\bar{D}_i \bar{c}_i}{RT} \left(\frac{\partial \mu_i}{\partial c_i} \text{grad} \bar{C}_i + v_i \text{grad} P \right) \quad (1.14)$$

Здесь если $i=W$, то c относится к воде, и если $i=S$ - к растворенному веществу.

Из этого уравнения можно при определенных допущениях получить упрощенные выражения для потоков.

Согласно К. Ли уравнение движущей силы мембранного процесса должно учитывать градиент концентраций в мембране. В таком случае уравнение переноса принимает вид:

$$J_i = -\frac{D_i K_i}{l_M} \left[C_{is}^h - C_{is}^l \exp \left(-\frac{v_i \Delta P}{RT} \right) \right] \quad (1.15)$$

При большой степени гидратации кроме диффузионного потока логично учитывать и вязкий поток. Это реализовано С. Тоне [56], при записи общего потока в виде:

$$J_i = K_f C_{is}^h \frac{\Delta P - \Delta \pi}{l_M} + \left(\frac{D_i K_i}{l_M} \right) \left[C_{is}^h - C_{is}^l \exp\left(-\frac{v_i \Delta P}{RT}\right) \right] \quad (1.16)$$

В формулах (1.17) и (1.18) C_i^h, C_i^l - концентрация i-го компонента в исходном растворе и в пермеате, соответственно; K_f - коэффициент проницаемости для вязкостного потока; K_i - коэффициент распределения.

Авторы [56] отмечают, что последнее уравнение применимо для описания процесса обратного осмоса при разделении водных растворов ароматических соединений.

1.4.3 Термодинамическая модель

Из уравнения термодинамики необратимых процессов были выведены уравнения, которые описывают потоки веществ в мембранах:

$$J_w = L_p (\Delta P - \sigma \Delta \pi) \quad (1.17)$$

$$J_s = \bar{C}_{ss} (1 - \sigma) J_w + P_d \Delta C_{ss} \quad (1.18)$$

где L_p - коэффициент, учитывающий фильтрацию раствора (механически); σ - коэффициент отражения, характеризует свойства мембраны; P_d - коэффициент, характеризующий проницаемость растворенного вещества через мембрану; $\Delta \pi$ - разность осмотических давлений по обе стороны мембраны; \bar{C}_{ss} - среднее значение исходной концентрации растворенного

вещества в растворе (C'_{ss}) и в пермеате (C''_{ss}) записывается в виде:

$$\bar{C}_{ss} = (C'_{ss} - C''_{ss}) \ln\left(\frac{C'_{ss}}{C''_{ss}}\right); \bar{C}_{ss}, \Delta C_{ss} - \text{разность концентраций по обе стороны}$$

мембраны, $\Delta C_{ss} = C'_{ss} - C''_{ss}$.

Однако эта модель не объясняет возникновение потоков веществ.

1.4.4 Уравнения переноса при электробаромембранном разделении

Н. С. Дмитриева [102] разделила поток ионов при электробаромембранном процессе на диффузионный и электроосмофильтрационный:

$$J_i = A_i(C_{pi} - C_{ni}) \pm B_i i \quad (1.19)$$

где C_{pi}, C_{ni} - концентрации i -го компонента в исходном растворе и пермеате, соответственно; i — плотность тока; A_i — постоянная, пропорциональная коэффициенту диффузии; B_i - число переноса иона в мембране. Для сравнения, Г. Л. Сухов предлагает общий поток ионов определять из равенства:

$$J_i = J_{oi}^m \exp\left(\frac{\Delta E_i}{RT}\right) \pm \overline{D}_i \frac{\Delta C_i}{l_m} \quad (1.20)$$

где J_{oi}^m - поток i -го компонента при $\Delta E_i = E_{oi} - E_i = 0$; E_i - энергия активации транспорта потока i через мембрану; R — универсальная газовая постоянная; T - температура; \overline{D} - коэффициент диффузии; ΔC - разность концентраций; l_m - толщина мембраны.

Другие обнаруженные нами при проведении литературного обзора способы описания потоков в процессах мембранного разделения с наложением электрического поля, принципиально не отличаются от представленных и сводятся к ним.

Существует ряд принципиально иных способов описания явлений переноса в целом. Примером таких способов могут служить вариационные [92]. Однако они не получили широкого распространения при написании математических моделей мембранных процессов.

1.5 Методы расчета технологических и прочностных характеристик мембранных аппаратов и установок

Существует несколько типов конструкций мембранных аппаратов и модулей для промышленного применения. Процесс проектирования часто сводится к обоснованному выбору существующей конструкции, определения основных характеристик и размеров, а также конструкционных материалов.

Важными характеристиками для каждого мембранного аппарата является плотность упаковки (величина поверхности мембран на единицу объема аппарата), размеры каналов, наличие турбулизаторов и застойных зон.

После выбора типа мембранного аппарата, определения типа мембран и необходимого дополнительного оборудования можно приступить к расчету мембранной установки. Расчет проводят для определения необходимой площади мембран (количества используемых мембранных модулей стандартной площади), секционирования установки, подбора насосного оборудования соответствующей мощности, определения энергопотребления установки [7, 103].

Рассмотрим порядок расчета в первом приближении. Записываем уравнение материального баланса и определяем расход пермеата:

$$W_{II} = W_0 - W_K = W_0 \cdot \left[1 - \left(\frac{c_K}{c_0} \right)^{\frac{1}{R}} \right] \quad (1.21)$$

где W_0 – расход раствора на разделение, c_0 – концентрация этого раствора, W_K – расход концентрата, c_K – концентрация концентрата, R – задерживающая способность мембраны по целевому компоненту.

Если принять удельную производительность равной среднему арифметическому между значениями ее для начальной и конечной концентраций, то можем определить необходимую площадь мембран:

$$F_P = \frac{W_{II}}{G_{\varphi}} \quad (1.22)$$

Исходя из площади мембран в каждом выбранном модуле, определяем число модулей:

$$N_{\text{мод}} = \frac{F_p}{F_{\text{мод}}} \quad (1.23)$$

$$N_{\text{анн}} = \frac{N_{\text{мод}}}{n_{\text{анн}}} \quad (1.24)$$

где $F_{\text{мод}}$ – площадь мембран в одном модуле; $n_{\text{анн}}$ – количество модулей в аппарате.

После расчета в первом приближении переходим к уточненному расчету. Найдем давление, которое необходимо обеспечивать насосу для функционирования установки. При этом будем учитывать величины гидравлических сопротивлений и потерей напора. На основании полученного давления следует в последующем производить прочностной расчет аппаратов.

Давление, обеспечиваемое насосом, Δp_H идет в мембранных установках на цели создания перепада рабочего давления по разные стороны полупроницаемой мембраны Δp_M , а также на преодоление гидравлических сопротивлений. Эти сопротивления можно разделить на сопротивления потоку исходного раствора Δp_α и потоку пермеата Δp_D , а также на потери давления: местные сопротивления и на трение Δp_{II} , а также на подъем раствора на заданную геометрическую высоту Δp_Γ :

$$\Delta p_H = \Delta p_M + \Delta p_\alpha + \Delta p_D + \Delta p_{\text{II}} + \Delta p_\Gamma \quad (1.25)$$

Величина Δp_M определяется свойствами выбранных мембран и концентрацией разделяемого раствора. Величина Δp_{II} – расчетная. Величина Δp_Γ зависит от условий расположения оборудования в цеху. Расчет Δp_α и Δp_D зависит от типа мембранных аппаратов.

На основании материального и теплового баланса процесса мембранного разделения осуществляют расчет основных характеристик

вспомогательного оборудования для мембранной установки. Критериями выбора оборудования также являются мощность, габариты и масса, стойкость материалов к агрессивным средам, энергопотребление и стоимость.

Расчет вспомогательного оборудования производится в том минимальном объеме, который будет достаточным для выбора каждой конкретной единицы оборудования из всего спектра доступных модификаций.

1.6 Аппаратурно-технологическое оформление мембранных процессов

Существуют различные классы установок мембранного разделения растворов. По типу процесса выделяют установки обратного осмоса, ультрафильтрации и др. По назначению установки делят на установки для опреснения, концентрирования, очистки и т.д. В зависимости от режима работы бывают непрерывные и периодические установки. Также выделяют прямоточные и циркуляционные установки по кратности циркуляции.

Можно выделить также два основных способа протекания процесса – тупиковый и проточный (рис. 1.1) [40, 104 - 109].

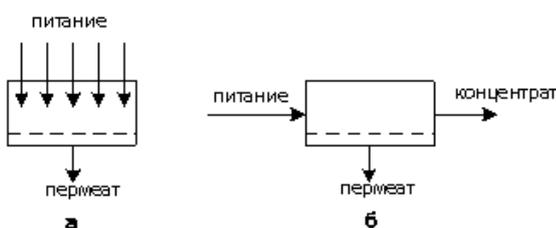


Рис. 1.1. Тупиковый (а) и проточный (б) способы мембранного разделения.

Применение тупикового способа, как правило, ограничено патронными модулями. А использование проточного способа требует учета ряда обстоятельств. Так, объемный расход по длине аппарата будет изменяться, за счет оттока пермеата, что ведет к увеличению влияния концентрационной поляризации. Кроме того увеличивается концентрация раствора по длине

аппарата и падает давление за счет гидравлических сопротивлений. Это приводит к необходимости применения каскадных многоступенчатых схем соединения аппаратов. Кроме того проточная схема позволяет использовать как прямоточную, так и циркуляционную конфигурацию потоков (рис. 1.2).

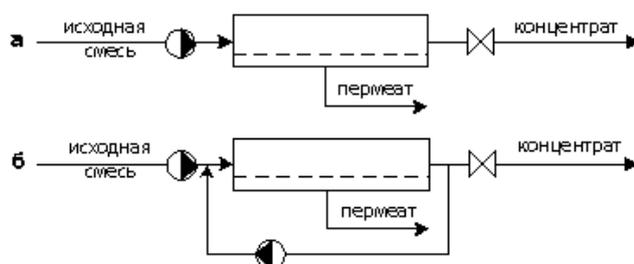


Рис.1.2. Принципиальная схема прямоточной (а) и циркуляционной (б) установок [40].

Применение циркуляционных конфигураций позволяет обеспечить высокую скорость раствора в напорном канале и снизить эффект гелеобразования на мембране.

Выделяют также установки одноступенчатые и многоступенчатые. Каждое однократное проникновение раствора через мембрану считается ступенью. Если одноступенчатый процесс не позволяет получить требуемого качества разделенных компонентов, применяют многоступенчатое мембранное разделение. На рис. 1.3 представлен простой вариант многоступенчатой установки.

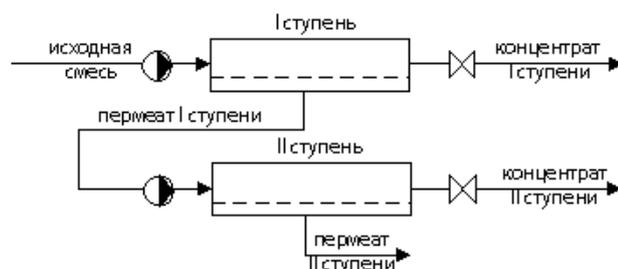


Рис. 1.3. Принципиальная схема двухступенчатой установки [40].

Существуют различные способы организации потока раствора в установке – секционированные и несекционированные установки мембранного разделения. Секционирование подразумевает соединение

аппаратов параллельно в секции и последовательное соединение секций между собой. Это позволяет поддерживать достаточно постоянную высокую скорость раствора в напорном канале, так как по мере сокращения расхода сокращается число мембранных аппаратов (см. рис. 1.4).

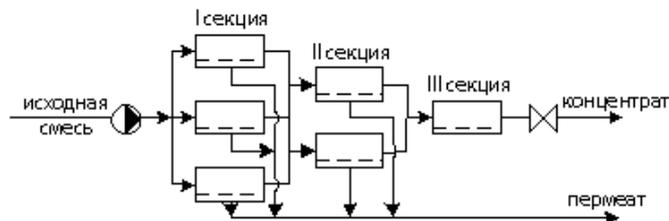


Рис. 1.4. Принципиальная схема мембранной установки из трех секций [40].

В циркуляционной схеме тот же эффект достигается установкой циркуляционного насоса. При этом противостоять снижению эффективности разделения можно используя схему из нескольких секций мембранных аппаратов с собственным циркуляционным насосом каждая (рис. 1.5).

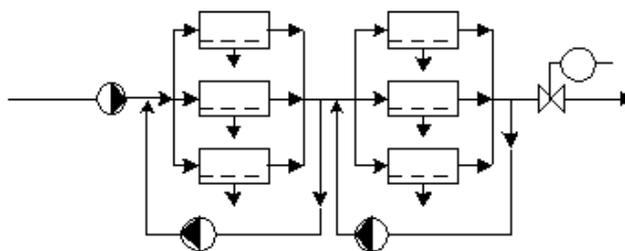


Рис. 1.5. Многосекционная циркуляционная схема [40].

Выбор той или иной схемы соединения аппаратов зависит от решаемой задачи в рамках конкретного производства [106, 110].

1.7 Выводы по главе и формулировка цели и задач исследования

По результатам проведенного обзора литературы проанализированы методы исследования, разработки, технологического оформления и расчета мембранных методов очистки и концентрирования вторичного молочного сырья. Отмечена существенная роль ультрафильтрационных процессов в концентрировании и очистке вторичных растворов молочного производства. Выявлены имеющиеся слабые стороны.

Можно сделать вывод, что мембранные методы разделения растворов имеют обширные перспективы в области переработки вторичного молочного сырья. А влияние наложения электрического поля на мембранные аппараты позволяет значительно варьировать характеристики мембранного процесса. Кроме того, выяснилось, что эффект наложения электрического поля при мембранном разделении вторичного молочного сырья изучен не достаточно. Необходимо дополнительное изучение кинетики массопереноса и влияния сторонних факторов при электробаромембранном разделении подсырной сыворотки, а также изучение способов снижения таких негативных эффектов наложения электрического поля, как нагревание раствора и окисление белков путем импульсного наложения тока.

По результатам обзора литературы следует также отметить необходимость не просто концентрирования вторичного молочного сырья, но и его деминерализации не ниже 80 %-го уровня для доведения качества до норм, регламентированных ГОСТ Р 53456-2009 «Концентраты сывороточных белков. Технические условия» [111 - 113].

По итогам проведенного анализа литературных данных можно сформулировать основные цели и задачи настоящей работы.

Целью данной работы является разработка и научное обоснование процесса ультрафильтрационного концентрирования и деминерализации подсырной сыворотки с импульсным подводом тока.

В рамках этого вопроса можно выделить *следующие задачи*:

- изучить технологические и кинетические характеристики процесса ультрафильтрационного концентрирования и деминерализации подсырной сыворотки с наложением электрических импульсов.

- разработать математическую модель процесса ультрафильтрационного концентрирования и деминерализации подсырной сыворотки, отличающуюся от известных представлений, учетом электрического импульса и величины осмотического давления раствора подсырной сыворотки.

- разработать численный метод реализации инженерного расчета аппарата для ультрафильтрационного процесса концентрирования и деминерализации подсырной сыворотки с учетом наложения электрического импульса.

- предложить численный метод расчета периода функционирования ультрафильтрационных мембран и элементов в процессе концентрирования и деминерализации сыворотки.

- разработать высокоэффективную конструкцию ультрафильтрационного аппарата плоскокамерного типа для концентрирования и деминерализации подсырной сыворотки с импульсным подводом тока.

- определить рациональные условия реализации процесса ультрафильтрационного концентрирования и деминерализации подсырной сыворотки с импульсным подводом тока.

- усовершенствовать технологическую схему линии концентрирования и деминерализации подсырной сыворотки для ООО «Бондарский сыродельный завод». Обосновать экономическую эффективность.

2. ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1 Объекты исследований

2.1.1 Мембраны

Изучение кинетических характеристик процесса мембранного концентрирования подсырной сыворотки осуществлялось при помощи ультрафильтрационных полупроницаемых мембран УАМ-150, УПМ-100 и УПМ-К. Все исследованные мембраны производятся ЗАО НТЦ «Владипор» г. Владимир. Выбор полимерных мембран основан на соотношениях радиусов пор и размеров молекул молочных белков и минеральных солей, а также на доступности и невысокой цене мембран. Полимерные мембраны имеют заряд и обладают ионообменными свойствами и электропроводностью, что позволяет одновременно с процессом концентрирования осуществлять деминерализацию. Основные параметры названных мембран представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1. Объекты исследований – мембраны [114].

Наименование мембраны	Материал активного слоя	Производительность по дистиллированной воде, $\text{м}^3/\text{м}^2\text{с}$	Коэффициент задержания		
			по миоглобину	по альбумину	по γ -глобулину
УПМ-100	полисульфонамид «Сульфон-4Т»	$2,33 \cdot 10^{-4}$	0,950	0,970	0,980
УПМ-К		$2,78 \cdot 10^{-5}$			
УАМ-150	ацетат целлюлозы	$4,11 \cdot 10^{-6}$	0,985	0,970	0,985

Мембраны, применявшиеся в исследованиях, проходили предварительный визуальный осмотр и подготовку. Целью визуального осмотра было выявление внешних дефектов, приводящих к негодности данного образца мембраны. В случае обнаружения трещин, сжатия поверхности или иных повреждений активного слоя образец мембраны заменялся на другой. Прошедшие осмотр мембраны отмачивались в дистиллированной воде с целью очищения от сорбированных примесей, которые могли остаться в процессе производства или хранения мембраны.

2.1.2 Промышленные растворы

Для исследования использовались промышленные растворы (подсырная сыворотка), получаемые при производстве сычужных сыров на ООО «Бондарский сыродельный завод» (Тамбовская область, с. Бондари), а также модельные растворы цельного молока [115].

Степень перехода компонентов исходного сырья в подсырную сыворотку на ООО «Бондарский сыродельный завод» представлена в таблице 2.2.

Таблица 2.2. Распределение компонентов молока [1, 2].

Компонент	Переход в сыр, %	Переход в сыворотку, %	Потери, %
Сухие вещества	48,5	48,5	3,0
Белки	76,0	22,0	2,0
Жир	86,0	10,0	4,0
Лактоза	5,0	92,0	3,0
Минеральные вещества	12,0	73,0	5,0

При этом состав сывороточных белков примерно следующий (таб. 2.3), а общий компонентный состав приведен в таблице 2.4.

Таблица 2.3. Содержание белков в молочной (подсырной) сыворотке [1, 2].

Наименование белка	Содержание в сывороточных белках, %
β -Лактоглобулин	50-55
α -Лактальбумин	20-25
Иммуноглобулины	10-15
Альбумин сыворотки крови	5-10
Гликомакропептиды	2-5
Лактоферрин	1-2

Таблица 2.4. Компонентный состав молочной (подсырной) сыворотки

[1, 2].

Компонент	Содержание 100 г сыворотки
Сухое вещество, г	6,34
Белки, г	0,89
Жиры, г	0,36
Углеводы, г	4,55
Лимонная кислота, г	0,016
Минеральные вещества (зола), г	0,7
Аминокислоты, мг	873
Макроэлементы, мг: кальций	84
калий	102
магний	10
натрий	5
фосфор	3
сера	2
хлор	77
Макроэлементы, мкг: алюминий	35
барий	7,4
бор	21
бром	14
ванадий	10,8
железо	47
йод	6,3
кадмий	1,3
кобальт	0,6
кремний	14,3
литий	13
марганец	4
медь	8
молибден	3,5
никель	2
селен	1,4
серебро	2,4
стронций	12
сурьма	1,75
фтор	14
хром	1,4
цинк	280
Витамины, мг: А	0,003
Е	0,03
С	1,17
В ₆	0,07
В ₁₂ , мкг	0,23
В ₂	0,14
В ₁	0,035
РР	0,05
Вода, г	93,66

2.1.3 Модельные растворы

Исследование влияния концентрации на различные параметры процесса мембранного концентрирования подсырной сыворотки проводилось с использованием модельных растворов, приготовленных разбавлением дистиллированной водой цельного молока или подсырной сыворотки.

Основными показателями качества белкового концентрата были выбраны содержание в концентрате молочных белков и минеральных солей в соответствии с ГОСТ Р 53456-2009 «Концентраты сывороточных белков сухие. Технические условия». Диапазоны исследуемых параметров: температуры 293...308 К, концентрации белков 9...32 кг/м³, концентрации минеральных солей 0,14...1,1 кг/м³ – выбирались исходя из начальных значений в исходном сырье и дальнейшего изменения параметров в процессе концентрирования и деминерализации до достижения установившегося вида кривых. Исследуемый диапазон рабочего давления 0,5...2,0 МПа выбирался исходя из значений осмотического давления подсырной сыворотки.

2.2 Методика и экспериментальная установка для исследования диффузионного потока

Схема установки, использовавшейся для проведения исследований диффузионного потока через мембраны, приведена на рис. 6. Две камеры установки I и II выполнены из оргстекла и вместе составляют рабочую ячейку суммарным объемом $0,62 \cdot 10^{-3}$ м³. В камеры ячейки введены измерительные капилляры 9 и 11. Растворы поступают в ячейку из емкостей для исходных растворов 2 и 4, и уходят в емкости для отработанных растворов 3 и 5. Камеры ячейки между собой разделены решеткой 10, изготовленной из оргстекла. На решетку укладывается мембрана 1 площадью $267 \cdot 10^{-6}$ м². Посредством термостата 12, термодатчика 7 и потенциометра 8 осуществляется контроль и поддержание заданной температуры в ячейке.

Магнитные мешалки 6 осуществляют перемешивание растворов в камерах ячейки.

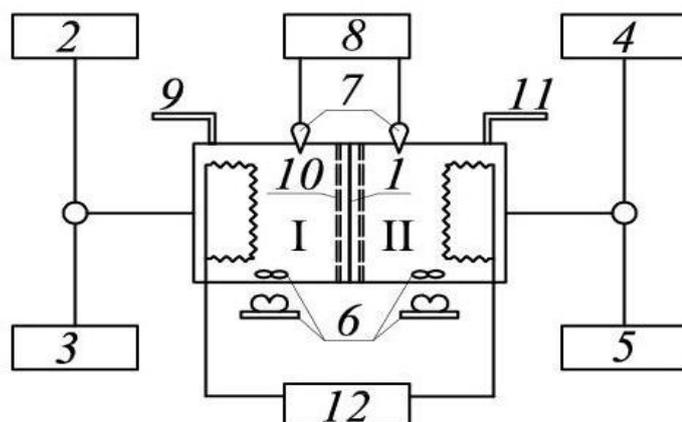


Рис. 2.1. Схема лабораторной установки для определения диффузионного потока через полимерные мембраны

1 – мембрана; 2 и 4 – емкости исходных растворов; 3 и 5 – емкости отработанных растворов; 6 – магнитные мешалки; 7 – терморпары; 8 – потенциометр; 9 и 11 – измерительные капилляры; 10 – решетка; 12 – термостат

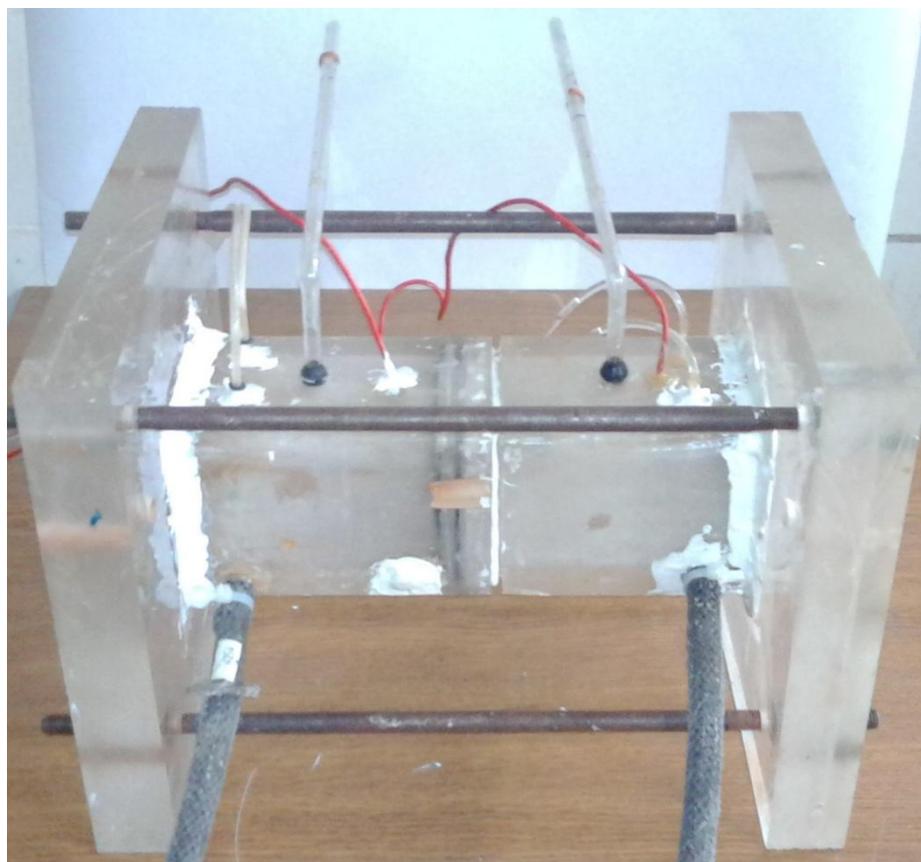


Рис. 2.2. Лабораторная ячейка для исследования диффузионного потока

На описанной выше установке (рис. 2.1) проводились исследования по следующей методике.

Предварительная подготовка мембран заключается в обжати вымоченной в дистиллированной воде мембраны на лабораторной мембранной установке при давлении 0,1 МПа в течение 4 часов.

Подготовленная мембрана размещалась на решетке между камерами I и II ячейки для исследования диффузионной проницаемости мембран. Установка собиралась и заполнялась следующим образом. В камеру I подавался раствор известной концентрации, а в камеру II – дистиллированная вода. Растворы выдерживаются в камерах в течение 11 – 13 часов с целью установления стационарных диффузионных потоков. Затем растворы сливаются, а камеры ячейки, после промывки дистиллированной водой, вновь заполняются по той же схеме. Отбор проб осуществляют из емкостей отработанных растворов, после чего камеры дополняют из емкостей исходных растворов.

На протяжении 3 - 6 часов осуществляют перемешивание растворов в камерах посредством магнитных мешалок. За это время растворенное вещество переходит посредством диффузии через мембрану в направлении противоположном направлению осмотического переноса. Количество перешедшего вещества определяют путем отбора проб после слива растворов в емкости для отработанных растворов. Посредством осмотического переноса чистая вода переходит через мембрану в направлении камеры II. Количественно перенос определяют по изменению объема в измерительных капиллярах.

Расчет коэффициента диффузионной проницаемости осуществляли по формуле:

$$P_{\delta} = \frac{C_2 \cdot V_2 \cdot \delta}{(C_1 - C_2) \cdot F_m \cdot \tau} \quad (2.1)$$

где P_{δ} - коэффициент диффузионной проницаемости, $C_{1,2}$ - концентрации растворенного вещества в камерах экспериментальной ячейки, разделенных

мембраной, кг/м^3 , δ - толщина мембраны после набухания, м, F_m - рабочая площадь поверхности мембраны, м^2 , τ - время проведения эксперимента, с, ΔV - объем перенесенного растворителя из одной камеры в другую, м^3 .

2.3 Методика и лабораторное оборудование для исследования сорбционных свойств мембран

Лабораторное оборудование, необходимое для исследования сорбционных свойств (коэффициента распределения) мембран, включает в себя лабораторные весы, микрометр, термостат, стеклянные бюксы и линейку. В данной работе применялось оборудование со следующими характеристиками: аналитические лабораторные весы А-31 с погрешностью измерений $\pm 0,5 \cdot 10^{-4}$ г; водяной термостат ТС-80М2 с рабочим диапазоном температур от 273 до 333 К; бюксы объемом 50 мл. Объем термостата составлял $0,024 \text{ м}^3$.

Методика проведения исследований заключалась в следующем. Вырезались образцы мембран заданного размера (60 x 150 мм). Их длина и ширина контролировались линейкой, а толщина – микрометром. Образцы подготавливались: обжимались в мембранной установке до получения постоянных значений производительности по дистиллированной воде. После подготовки толщина мембраны вновь измерялась микрометром. В стеклянных бюксах готовили раствор известной концентрации, в который помещали мембраны после подготовки и плотно закрывали. Бюксы помещались в термостат с заданной температурой и выдерживались в нем в течение суток. Затем мембраны извлекались и вновь измеряли их линейные размеры: длину, ширину и толщину. Измеряли концентрацию растворов в бюксах и определяли разницу исходной и конечной концентраций:

$$\Delta C = C_{исх} - C_{кон}; \quad (2.2)$$

После насыщения мембраны растворенным веществом в системе устанавливается равновесие. При этом равновесным коэффициентом

распределения называется отношение концентраций растворенного вещества в мембране и в исходном растворе, если считать в первом приближении, что концентрация растворенного вещества в мембране изменяется скачкообразно от $C_{исх}$ до C_m :

$$k_p = C_m / C_{исх}, \quad (2.3)$$

где k_p – коэффициент распределения; C_m – равновесная концентрация растворенного вещества в исследуемом образце мембраны, кг/м³; $C_{исх}$ – равновесная концентрация растворенного вещества в исходном исследуемом растворе, кг/м³.

При этом концентрацию растворенного вещества в мембране определяли отношением экспериментально измеренной массы растворенного вещества в мембране m_m к объему мембраны V_m :

$$C_m = m_m / V_m, \quad (2.4)$$

где объем мембраны определялся как произведение длины a , ширины b и толщины δ :

$$V_m = a \cdot b \cdot \delta; \quad (2.5)$$

Приведенные выше выражения следуют из материального баланса системы мембрана-раствор:

$$C_{исх} \cdot V_{исх} = C_m \cdot V_m + C_1 \cdot V_{исх}, \quad (2.6)$$

где $C_{исх}$ – концентрация растворенного вещества в исходном растворе, $V_{исх}$ – объем исходного раствора, C_m – концентрация растворенного вещества в мембране, V_m – объем мембраны, C_1 – концентрация растворенного вещества в растворе по окончании процесса сорбции.

Концентрации растворенного вещества определялись методом формольного титрования [116].

2.4 Методика и экспериментальная установка для исследования коэффициента задержания и удельного потока растворителя

Схема экспериментальной мембранной установки, на которой производились исследования коэффициента задержания мембран и удельного потока растворителя через мембрану, приведена на рис. 2.3.

Установка работает следующим образом. Плунжерным насосом 2 рабочий раствор из исходной емкости 1 подается в камеру разделения рабочей ячейки 3. В экспериментальной установке использовался плунжерный дозирующий насос с водяным охлаждением НД 100/63. Возврат рабочего раствора в исходную емкость 1 осуществлялся через дроссель 4 и поплавковые ротаметры 5. Поддержание давления в установке осуществляется компрессором высокого давления 9, заполняющим ресивер 6 сжатым воздухом. Объем ресивера составляет $V=3,5$ л, а давление сжатого воздуха – 30-40% от рабочего давления в установке. Ресивер также служит целям сглаживания пульсаций давления в системе. Контроль давления осуществляется при помощи манометра 7, электроконтактного манометра 15 и образцовым манометром 8.

Регулирование расхода раствора на данной установке осуществляется регулировкой хода плунжера насоса 2. Регулировка температуры в установке осуществлялась при помощи термостата 10 или подводом охлаждающего агента в охлаждающие камеры разделительной ячейки 3. Установка позволяет осуществлять автоматического поддержание температуры при помощи потенциометра 11 и термометра 12, связанных с термостатом 10. Регулировка и подача электрических импульсов при проведении процессов мембранного разделения осуществлялась при помощи источника электрических импульсов 13. Для сбора пермеата, прошедшего через мембрану, служит емкость 14.

Вентили и трубопроводы, контактирующие с рабочим раствором, изготовлены из нержавеющей стали. Описанная установка позволяет

осуществлять мембранные процессы с отклонениями значений расхода и давления не более 5% от заданных значений. Исследования на установке возможно осуществлять как с наложением электрических импульсов, так и без них. Источником электрических импульсов служил блок питания «ЛАТР-1М» и электромагнитное реле. Характеристики подаваемых импульсов тока измерялись амперметром и вольтметром В7-27А.

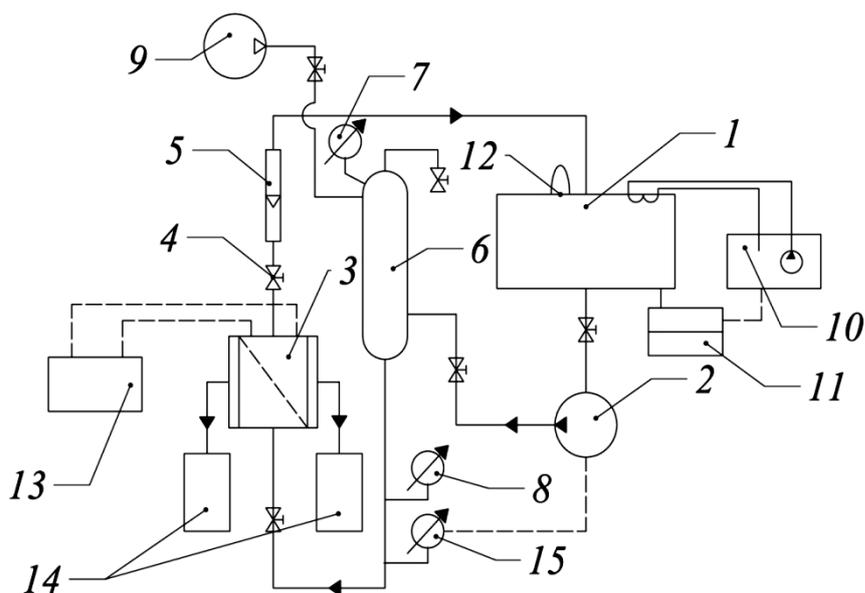


Рис.2.3 Схема лабораторной мембранной установки

1 – исходная емкость; 2 – плунжерный насос; 3 – ультрафильтрационный аппарат;
 4 – дроссель; 5 – поплавковые ротаметры; 6 – ресивер; 7 – манометр;
 8 - образцовый манометр; 9 – компрессор, 10 – термостат, 11 – потенциометр;
 12 – термометр; 13 – источник электрических импульсов; 14 – емкость сбора пермеата;
 15 – электроконтактный манометр.

Исследуемые образцы мембран осматривались на наличие внешних дефектов и затем вымачивались в дистиллированной воде с целью вымывания посторонних примесей. Затем мембрану окунали в исследуемый раствор и размещали в разделительной ячейке. В качестве подложки использовали ватман для недопущения контакта мембраны с металлическими поверхностями. Активным слоем мембрану ориентировали к разделяемому раствору. После подключения разделительной ячейки с мембраной к установке, описанной выше, устанавливали необходимое

значение расхода разделяемого раствора и подавали охлаждающую жидкость к плунжеру насоса. Включив насос, при закрытом вентиле 4 добивались постепенного увеличения давления в системе. Так называемый холостой опыт проводился в течение 30 минут, с возвращением пермеата из емкости 14 в исходную емкость 1.

После окончания холостого опыта раствор из установки сливался в исходную емкость 1. Затем установку запускали и выводили на рабочий режим. В таком режиме осуществляли контрольный опыт в течение 4 часов. За это время мембраны обжимались и приводились в рабочее состояние.

После процедуры обжатия мембран установка готова к проведению рабочего опыта. Этот опыт осуществлялся в течение 0,5 – 2 часов, в зависимости от необходимых объемов пермеата и выбранного расхода. После проведения экспериментов установку отключали, давление в системе сбрасывали. Время проведения рабочего опыта фиксировалось секундомером. Определялся объем собранного пермеата и концентрация целевого вещества в нем.

Внешний вид установки для исследования коэффициента задержания и удельного потока растворителя приведен на рис. 2.4



Рис. 2.4 Плоскокамерная мембранная установка для исследования коэффициента задержания и удельного потока растворителя с наложением электрических импульсов

1- ультрафильтрационная ячейка (аппарат), 2-игольчатые вентили, 3-блок управления, 4 – источник электрических импульсов и измерительные приборы, 5- блок манометров.

В качестве лабораторной ультрафильтрационной ячейки использовался двухкамерный аналог мембранного аппарата с плоскими фильтрующими элементами, который был разработан в рамках данного исследования и на который получен патент № 2532813 RU [3]. Подробнее ультрафильтрационный аппарат описан в главе 5.

По полученным в ходе экспериментов данным вычисляли значение экспериментального коэффициента задержания по формуле:

$$K = 1 - \frac{C_{пер}}{C_{исх}}, \quad (2.7)$$

где K - коэффициент задержания; $C_{пер}$ - концентрация растворенного вещества в пермеате, кг/м³; $C_{исх}$ - концентрация растворенного вещества в исходном растворе, кг/м³.

Для определения удельного потока растворителя использовали формулу:

$$J = \frac{V}{F_m \cdot \tau}, \quad (2.8)$$

где V - объем собранного пермеата, м³; F_m - площадь поверхности мембран, м²; τ - время проведения эксперимента, с.

2.5 Выводы по второй главе

1. Рассмотрены основные объекты исследований процесса ультрафильтрационного концентрирования и деминерализации. Описаны применяемые в исследованиях ультрафильтрационные мембраны с указанием их основных физико-химических характеристик и методики их подготовке к работе. Рассмотрены исследуемые промышленные и модельные растворы, приведен их компонентный состав и физико-химические свойства.

2. Усовершенствованы для адаптации к биологическим растворам и описаны экспериментальные установки для исследования основных кинетических и технологических характеристик процесса ультрафильтрационного концентрирования и деминерализации (сорбционные свойства, диффузионный поток, коэффициент задержания и удельный поток растворителя). Усовершенствован и описан плоскокамерный аппарат с импульсным подводом тока для ультрафильтрационного концентрирования и деминерализации подсырной сыворотки.

3. Разработаны методики экспериментальных исследований коэффициента задержания и удельного потока растворителя на ультрафильтрационном аппарате плоскокамерного типа с наложением электрических импульсов.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ КИНЕТИКИ КОНЦЕНТРИРОВАНИЯ ПОДСЫРНОЙ СЫВОРОТКИ

3.1 Исследования сорбционных свойств мембран

На этапе выбора мембран и предварительного определения условий проведения мембранного процесса важно изучение сорбционных характеристик мембран при работе в среде подсырной сыворотки.

На сорбцию веществ из сыворотки оказывает влияние концентрация веществ в исходной сыворотке и температура проведения процесса. В рамках данной работы были проведены исследования коэффициента распределения молочных белков и минеральных солей в ультрафильтрационных мембранах УАМ-150, УПМ-100 и УПМ-К. Исследования проводились при различных концентрациях исходного раствора и различных температурах.

Результаты экспериментальных исследований представлены в таблице (приложение Б) и на рис.3.1 - 3.3.

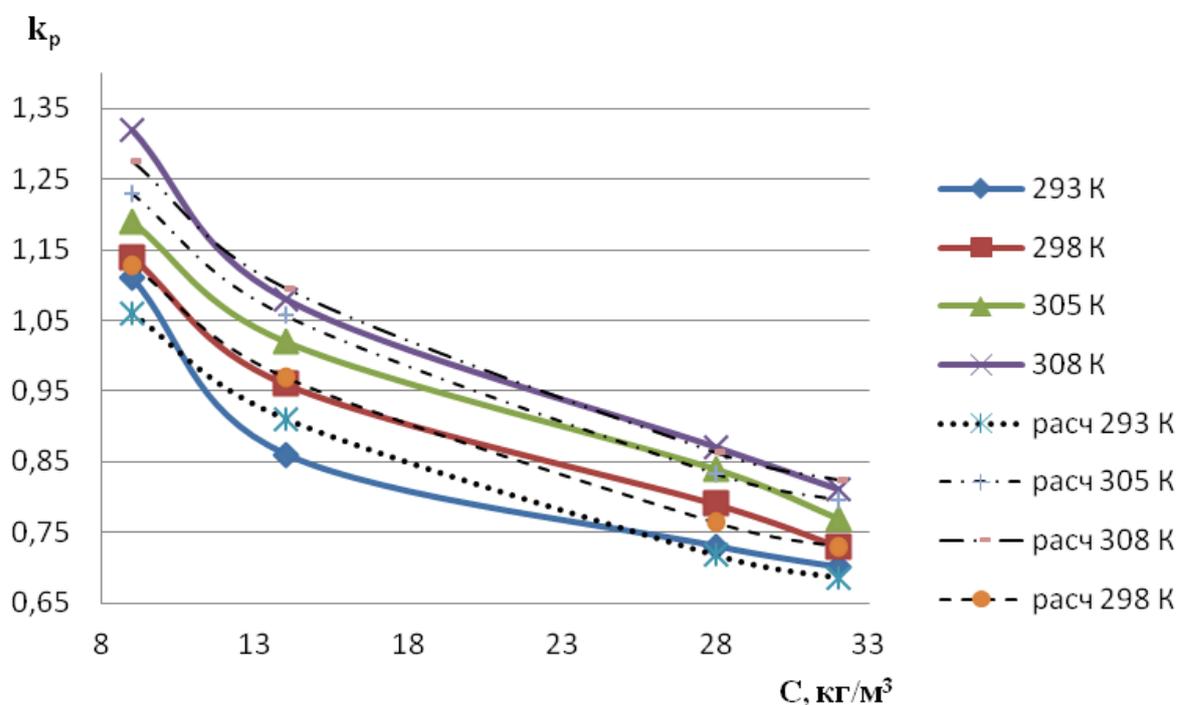


Рис. 3.1. Зависимость коэффициента распределения (k_p) от концентрации белка (C , кг/м³) и температуры (T , К) для ультрафильтрационной мембраны УАМ-150.

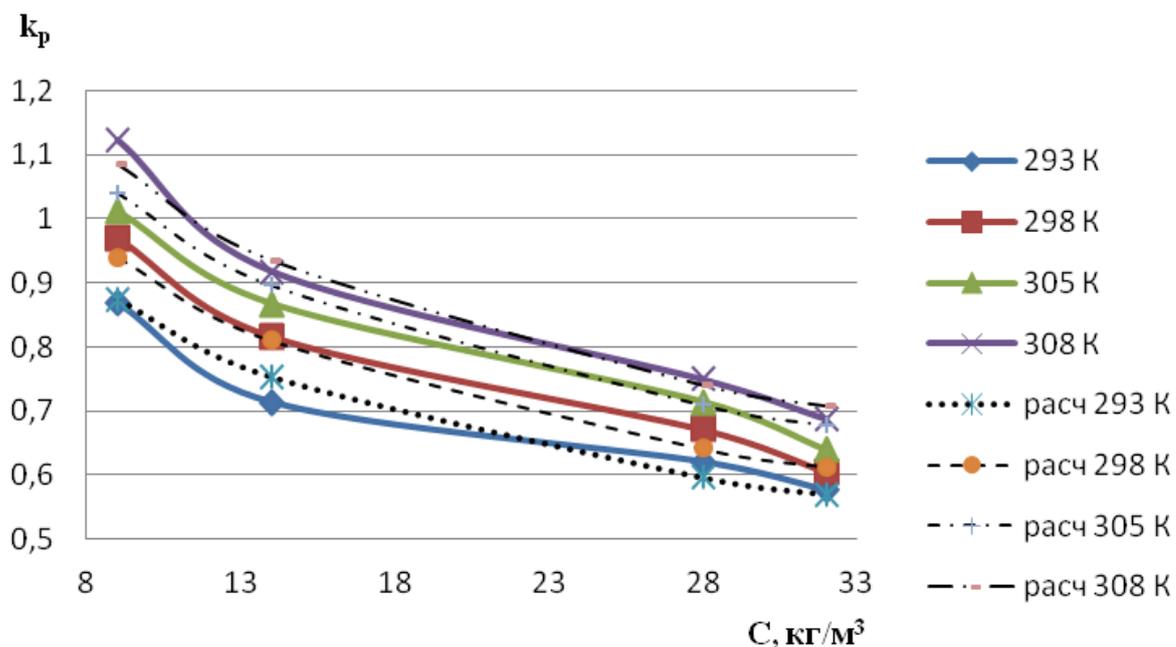


Рис. 3.2. Зависимость коэффициента распределения (k_p) от концентрации белка (C , кг/м³) и температуры (T , К) для ультрафильтрационной мембраны УПМ-100.

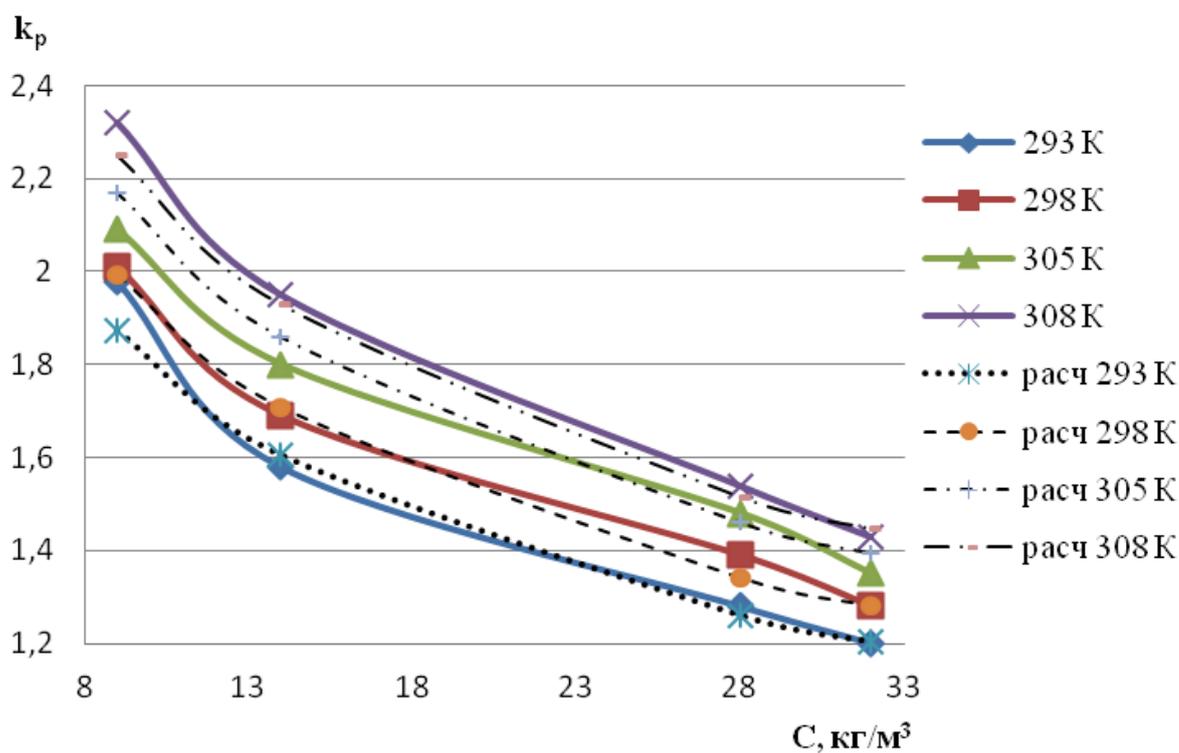


Рис. 3.3. Зависимость коэффициента распределения (k_p) от концентрации белка (C , кг/м³) и температуры (T , К) для ультрафильтрационной мембраны УПМ-К.

Из зависимостей следует, что с увеличением концентрации белка в исходном растворе его концентрация в мембране увеличивается. Эта тенденция прослеживается для всех видов исследуемых мембран.

Как видно из графиков, мембрана УПМ-К сорбирует растворенный белок в большей степени, чем мембраны УАМ-150 и УПМ-100. Это явление объясняется физико-химической природой матрицы полупроницаемых мембран и знаком заряда активного слоя мембраны (ацетилцеллюлозные мембраны несут отрицательный, а полиамидные – положительный заряды). Значительное влияние оказывает также характер и величина пор полимерных мембран.

Изменение температуры проведения мембранного процесса может оказывать различное влияние на сорбционную активность мембран – как положительное, так и отрицательное. В исследуемом случае, с увеличением температуры разделяемого раствора молочный белок сорбируется ультрафильтрационными мембранами в меньшей степени. Также известно, что чем выше растворимость исследуемого вещества в растворителе, тем оно меньше адсорбируется адсорбентом.

Необходимым условием качественного концентрирования сывороточного белка является обессоливание концентрата. Поэтому были исследованы сорбционные характеристики мембран применительно к содержащимся в сыворотке минеральным солям.

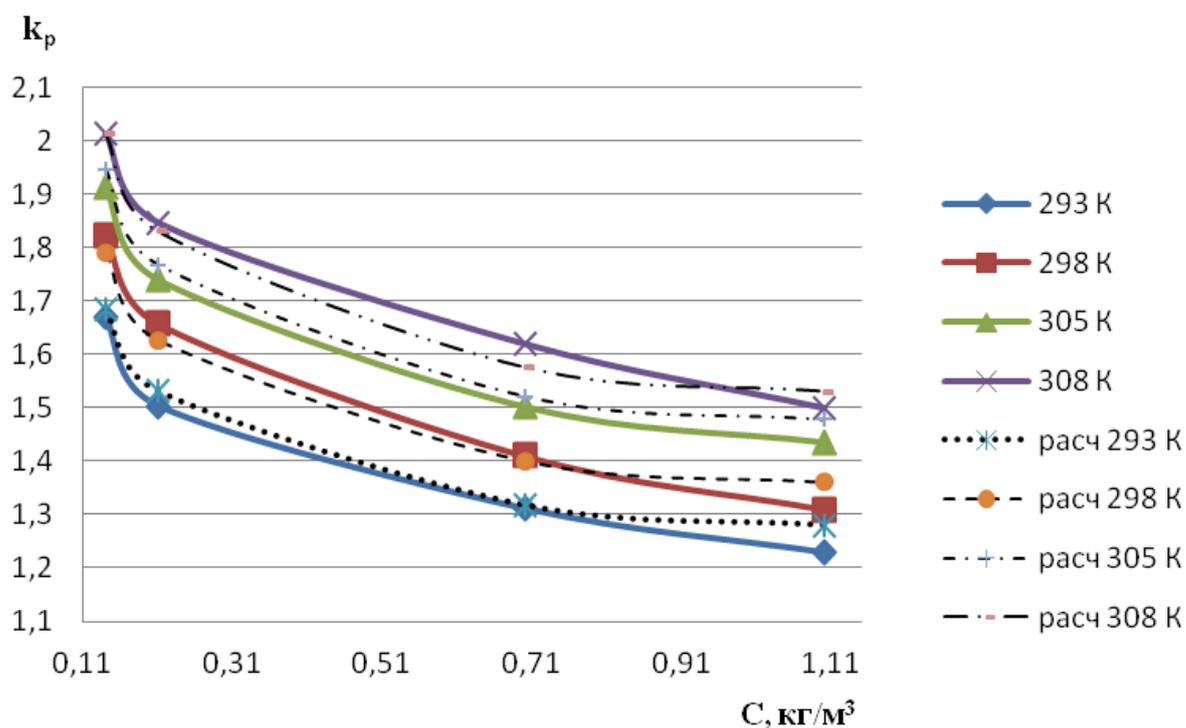


Рис. 3.4. Зависимость коэффициента распределения (k_p) от концентрации минеральных солей (C , kg/m^3) и температуры (T , K) для ультрафильтрационной мембраны УАМ-150.

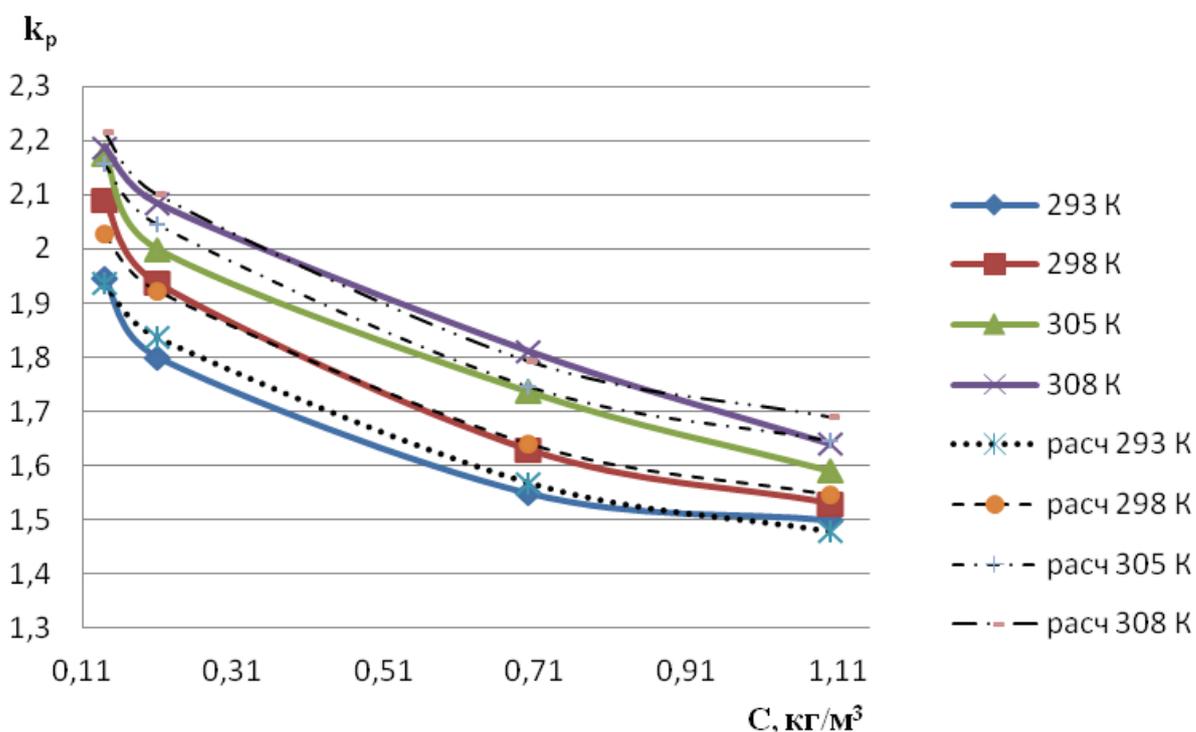


Рис. 3.5. Зависимость коэффициента распределения (k_p) от концентрации минеральных солей (C , kg/m^3) и температуры (T , K) для ультрафильтрационной мембраны УПМ-100.

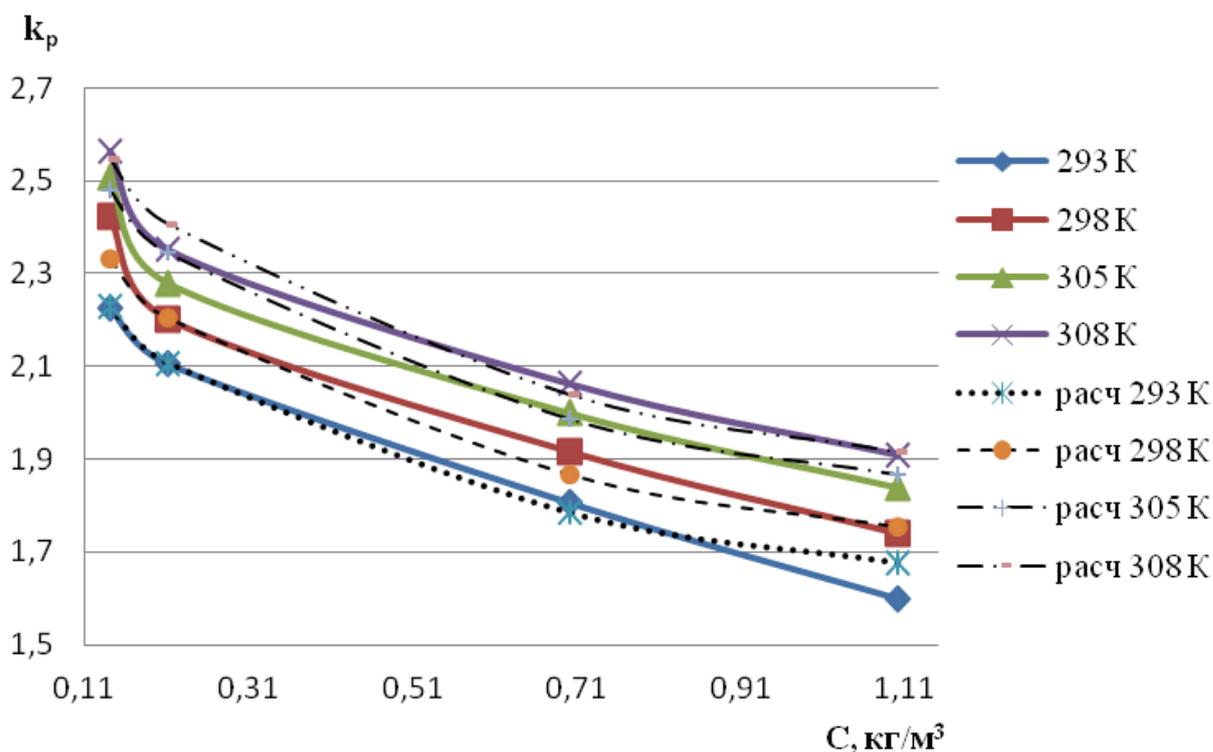


Рис. 3.6. Зависимость коэффициента распределения (k_p) от концентрации минеральных солей (C , $\text{кг}/\text{м}^3$) и температуры (T , К) для ультрафильтрационной мембраны УПМ-К.

Из зависимостей видно, что характеристики сорбции солей мембранами сходны с сорбцией белка. При этом абсолютные величины коэффициента распределения несколько выше, что объясняется меньшими размерами молекул минеральных солей, по сравнению с белковыми молекулами. Здесь следует понимать, что процессы сорбции солей и белка происходят в среде подсырной сыворотке одновременно и оказывают друг на друга значительное влияние. Молекулы солей плотно удерживаются в поровых пространствах мембраны за счет закупоривания значительно большими молекулами белка.

Для аналитического определения коэффициента распределения предложено использовать выражение вида:

$$k_p = (b \cdot C_{\text{исх}}^n \cdot (293/T)^m) / C_{\text{исх}}, \quad (3.1)$$

Таблица 3.1. – Значения эмпирических коэффициентов для уравнения 3.1.

Мембрана	Белок			Соли		
	b	n	m	b	n	m
УАМ-150	2,25564	0,65616	-3,71567	1,26975	0,86397	-3,56783
УПМ-100	1,82953	0,66343	-4,34813	1,49669	0,86891	-2,68888
УПМ-К	4,02873	0,65104	-3,68869	1,69857	0,86186	-2,66093

Отклонение расчетных значений коэффициента распределения от полученных экспериментально значений коэффициента распределения не превышает 10%.

3.2 Исследования диффузионных свойств мембран

В исследовании свойств мембран в среде подсырной сыворотки большое значение имеют диффузионные свойства мембран по отношению к отдельным компонентам сыворотки. В рамках данной работы наибольший интерес представляет диффузионный поток белка и минеральных солей через мембрану. Поэтому были получены экспериментальные зависимости величины диффузионного потока для белковых молекул и минеральных солей через исследуемые образцы мембран.

Результаты экспериментальных исследований представлены в таблице (приложение Б) и на рис.3.7 - 3.12.

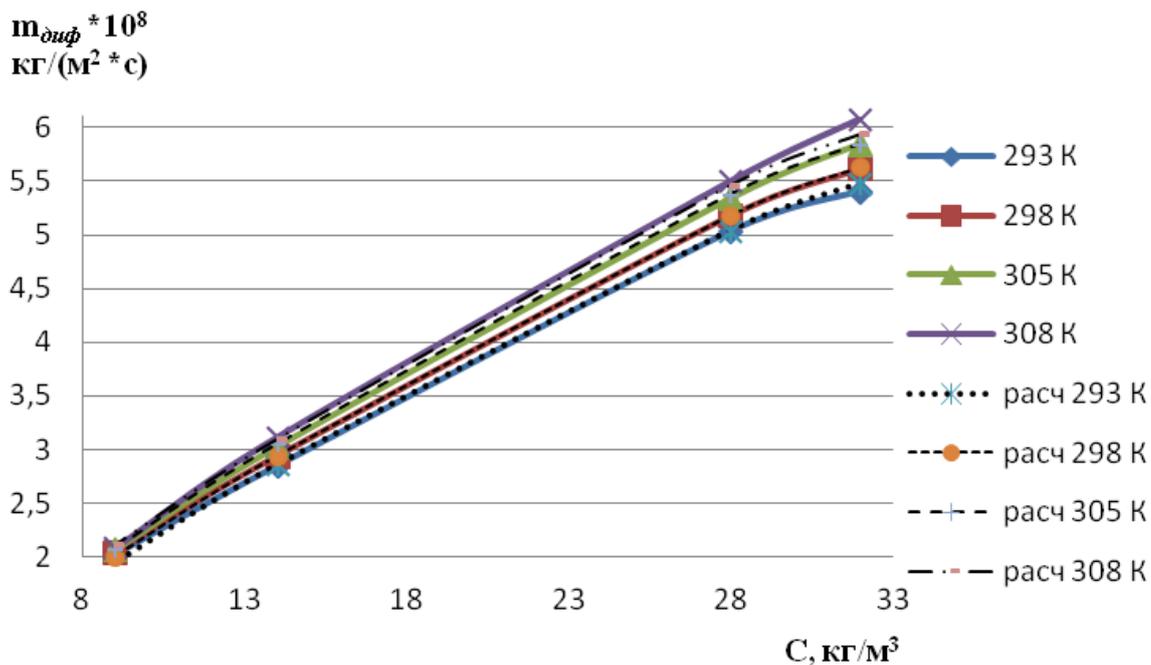


Рис. 3.7. Зависимость диффузионного потока (m_{diff} , $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$) белка от концентрации раствора (C , $\text{кг}/\text{м}^3$) для ультрафильтрационной мембраны УАМ-150 при $P=1$ МПа.

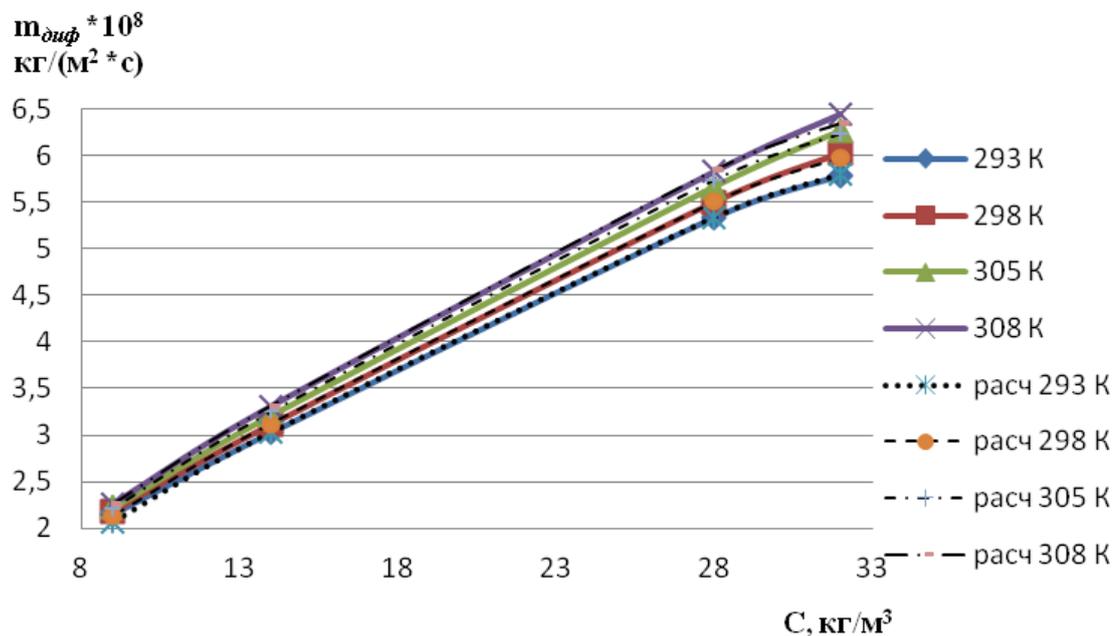


Рис. 3.8. Зависимость диффузионного потока (m_{diff} , $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$) белка от концентрации раствора (C , $\text{кг}/\text{м}^3$) для ультрафильтрационной мембраны УПМ-100 при $P=1$ МПа.

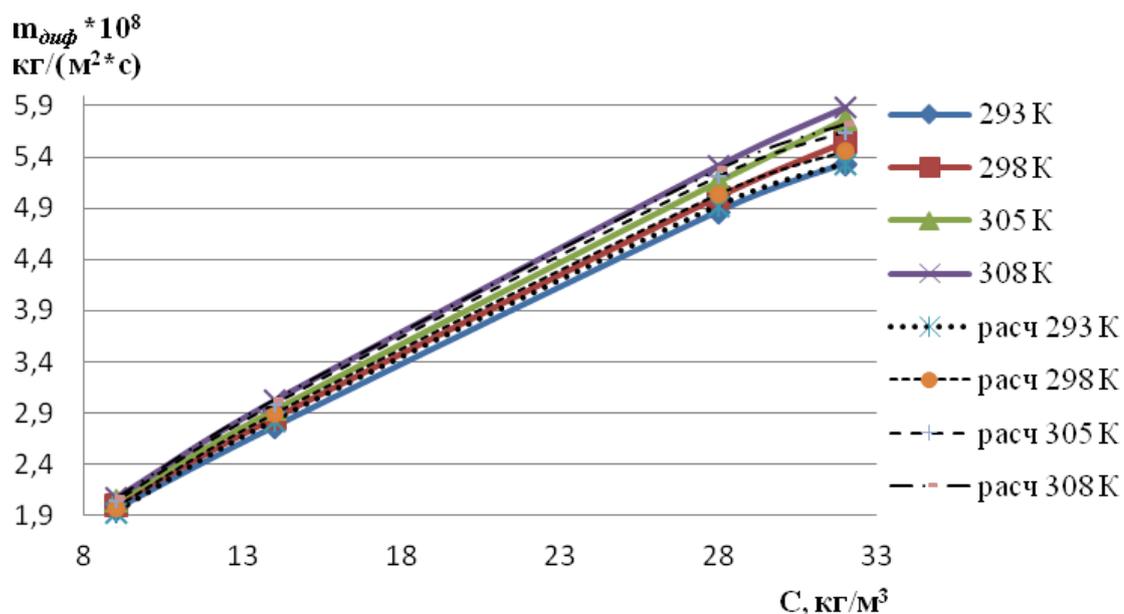


Рис. 3.9. Зависимость диффузионного потока (m_{diff} , кг/(м²·с)) белка от концентрации раствора (C , кг/м³) для ультрафильтрационной мембраны УПМ-К при $P=1$ МПа.

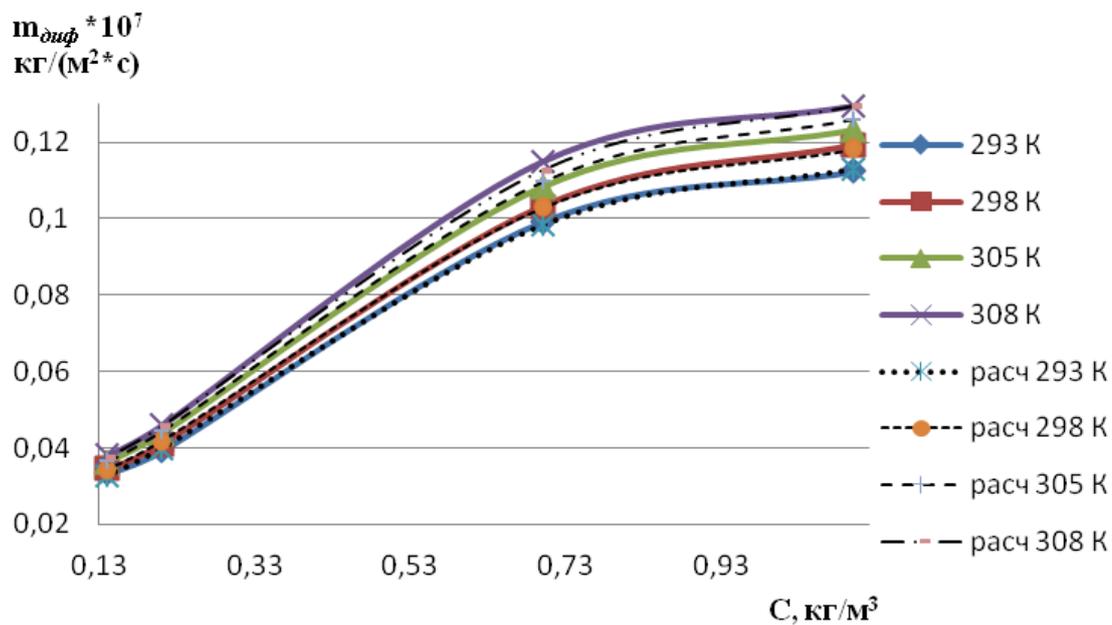


Рис. 3.10. Зависимость диффузионного потока (m_{diff} , кг/(м²·с)) минеральных солей от концентрации раствора (C , кг/м³) для ультрафильтрационной мембраны УАМ-150 при $P=1$ МПа.

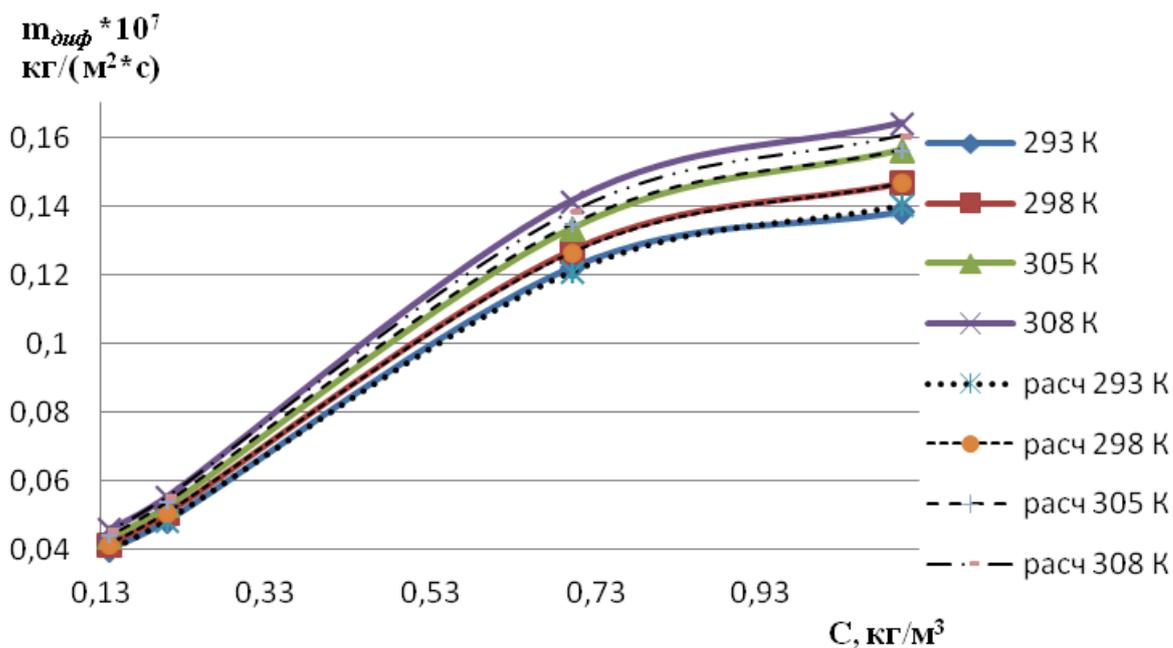


Рис. 3.11. Зависимость диффузионного потока ($m_{диф}$, кг/(м²·с)) минеральных солей от концентрации раствора (C , кг/м³) для ультрафильтрационной мембраны УПМ-100 при $P=1$ МПа.

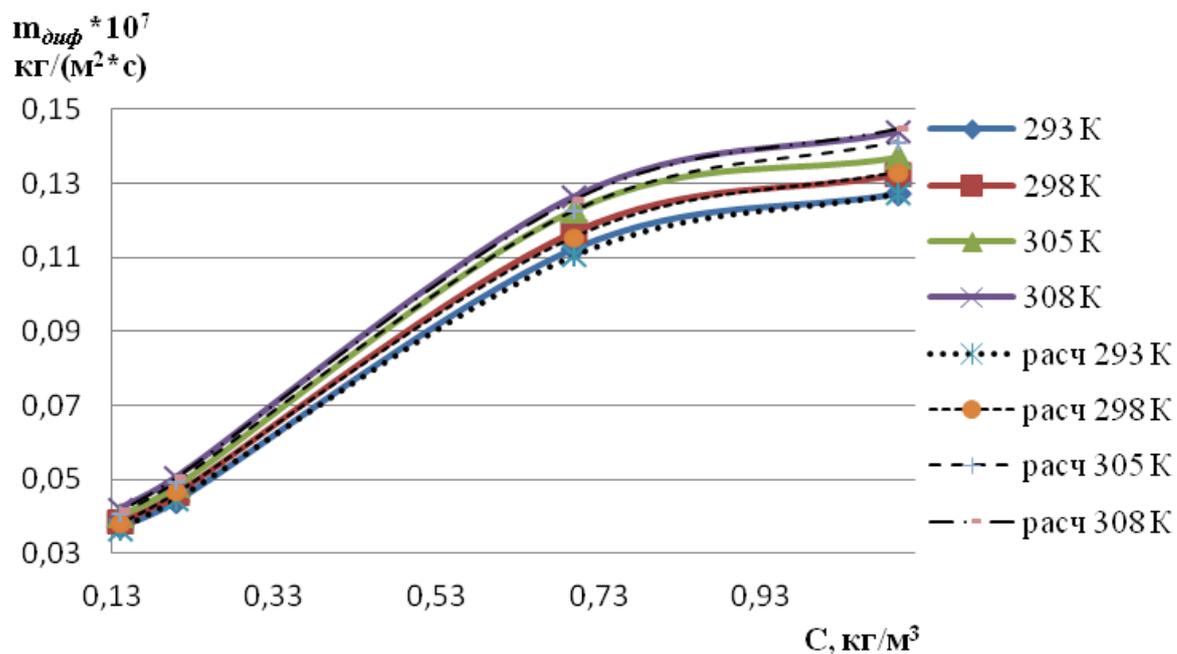


Рис. 3.12. Зависимость диффузионного потока ($m_{диф}$, кг/(м²·с)) минеральных солей от концентрации раствора (C , кг/м³) для ультрафильтрационной мембраны УПМ-К при $P=1$ МПа.

Из приведенных зависимостей видно, что наибольшей диффузионной проницаемостью из исследуемых образцов обладает мембрана УПМ-К, что хорошо соотносится с результатами экспериментального определения сорбционных характеристик мембран. Значения диффузионного потока для минеральных солей значительно выше аналогичных значений для белка. Это связано с небольшими размерами молекул солей, позволяющими им легко проходить сквозь поры мембран. Наблюдаемую при этом высокую проницаемость можно выгодно использовать для деминерализации белкового концентрата.

Для аналитического расчета диффузионного потока вещества использовалось выражение:

$$m_{\text{диф}} = \frac{P_{\delta}}{\delta} (C_{\text{perm}} - C_{\text{неp}}); \quad (3.2)$$

где коэффициент диффузионной проницаемости P_{δ} ($\text{м}^2/\text{с}$) определяется по формуле:

$$P_{\delta} = A \cdot \exp(B \cdot C) \cdot \left(\frac{T}{T_0} \right)^m \quad (3.3)$$

Таблица 3.2. – Значения эмпирических коэффициентов для уравнения 3.3.

Мембрана	Белок			Соли		
	$A \cdot 10^{12}$	B	m	$A \cdot 10^{12}$	B	m
УАМ-150	2,54115	-0,00754	1,61834	11,28404	-0,22422	2,73632
УПМ-100	2,62355	-0,00746	1,81356	11,62635	-0,20161	2,71653
УПМ-К	2,54115	-0,00754	1,61834	12,26613	-0,21793	2,58079

Для определения непосредственно коэффициента диффузии D , $\text{м}^2/\text{с}$ исследуемого компонента через материал мембраны можно воспользоваться выражением:

$$D = \frac{P_{\delta}}{k_p}. \quad (3.4)$$

Расхождения расчетных значений коэффициента диффузионной проницаемости с применением эмпирических коэффициентов из таблицы 3.2 и полученных экспериментально значений коэффициента диффузионной проницаемости не превышали 10 %.

3.3 Исследования коэффициентов задержания

Важнейшей характеристикой мембранного процесса является коэффициент задержания мембраной ценного компонента, в данном случае белка. Графики зависимостей коэффициента задержания белка мембранами от давления и концентрации раствора представлены на рис. 3.13 – 3.15. Кроме того, для оценки процесса деминерализации сывороточного концентрата, были получены экспериментальные зависимости коэффициента задержания мембранами минеральных солей от давления и концентрации солей в растворе (рис. 3.16 – 3.18).

На коэффициент задержания значительное влияние оказывают концентрация раствора, вид мембраны и природа растворенного вещества. По мере увеличения концентрации растворенных веществ возрастает вероятность образования диффузионных пограничных слоев у поверхности мембран, что приводит к усилению влияния явления концентрационной поляризации на коэффициент задержания.

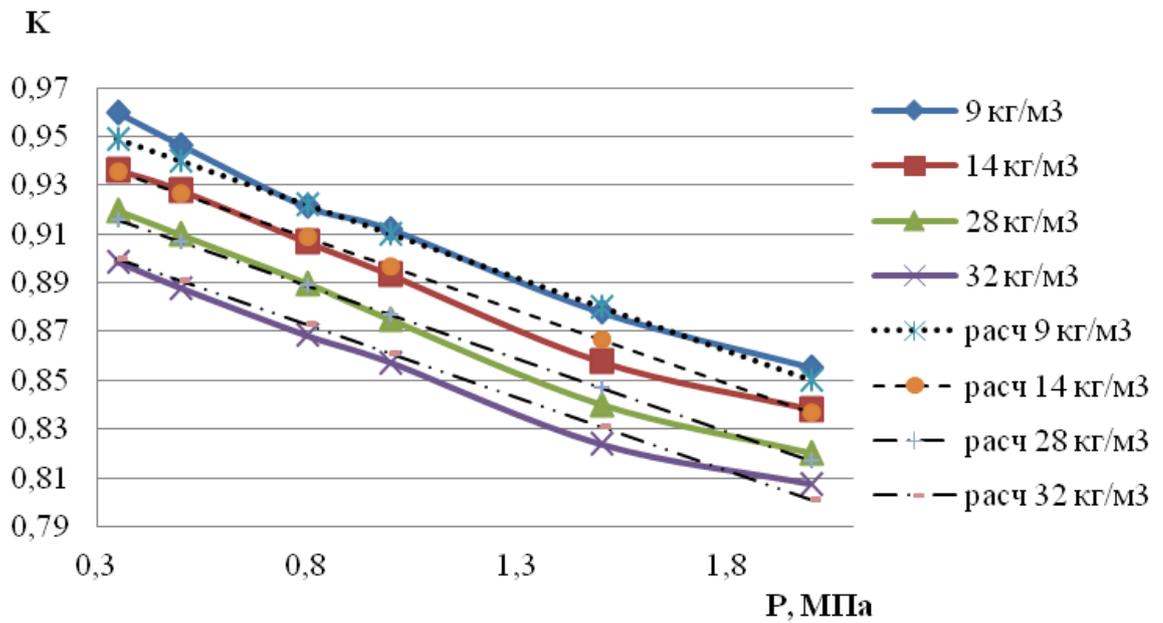


Рис. 3.13. Зависимость коэффициента задержания (K) белка от давления (P , МПа) при различных концентрациях белка для ультрафильтрационной мембраны УАМ-150.

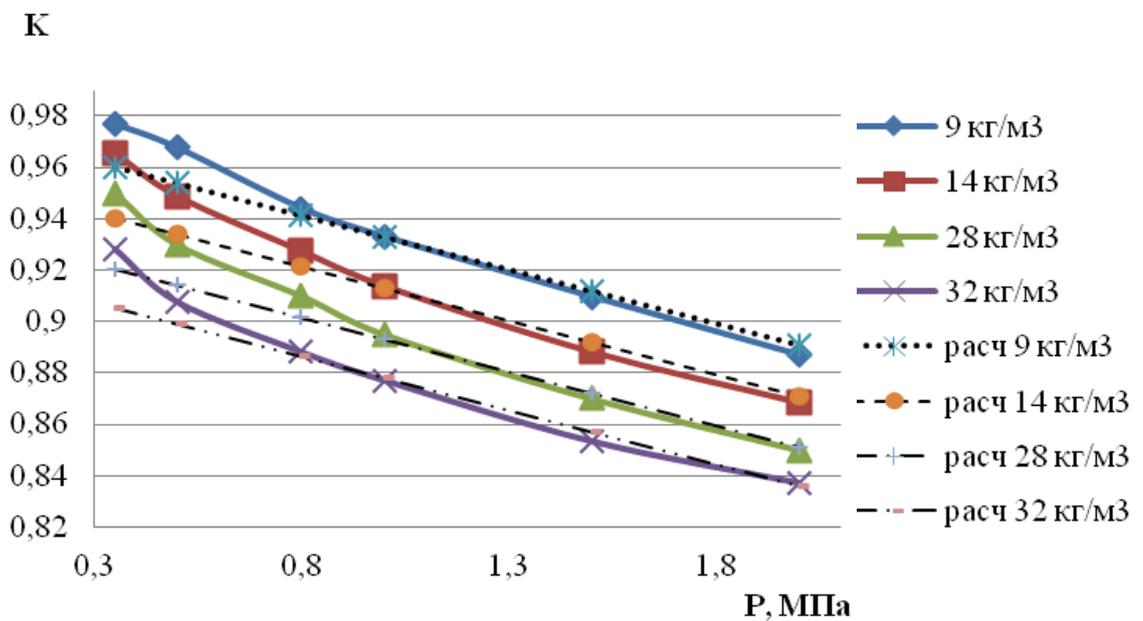


Рис. 3.14. Зависимость коэффициента задержания (K) белка от давления (P , МПа) при различных концентрациях белка для ультрафильтрационной мембраны УПМ-100.

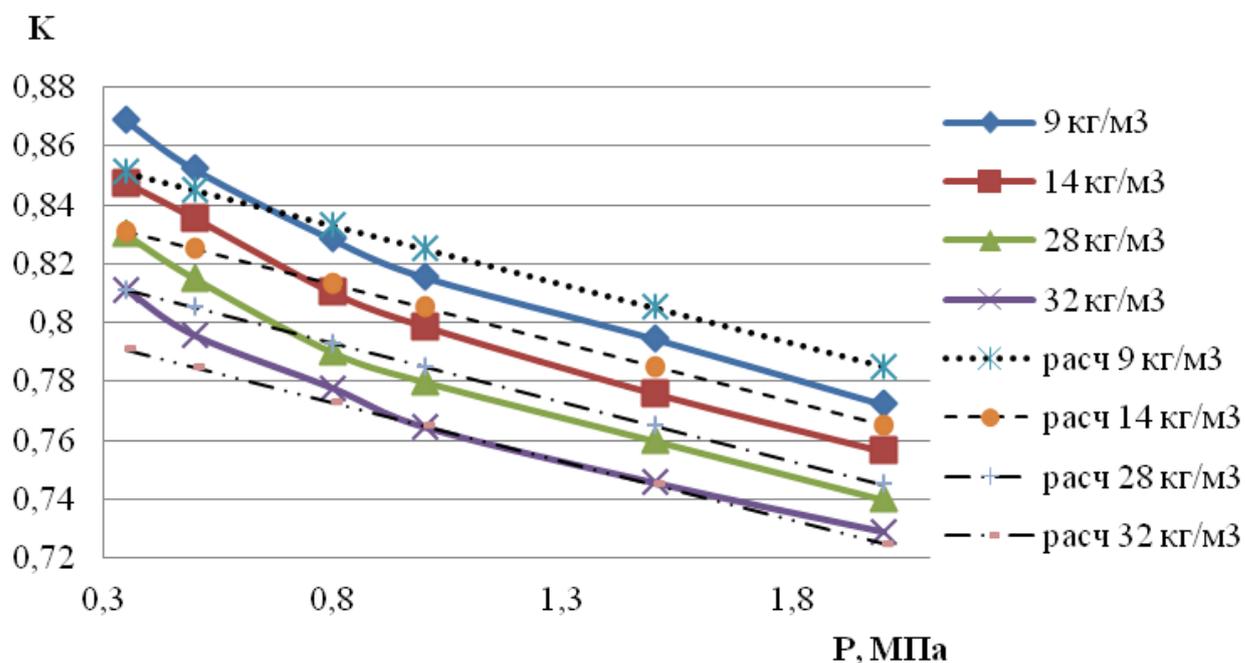


Рис. 3.15. Зависимость коэффициента задержания (K) белка от давления (P , МПа) при различных концентрациях белка для ультрафильтрационной мембраны УПМ-К.

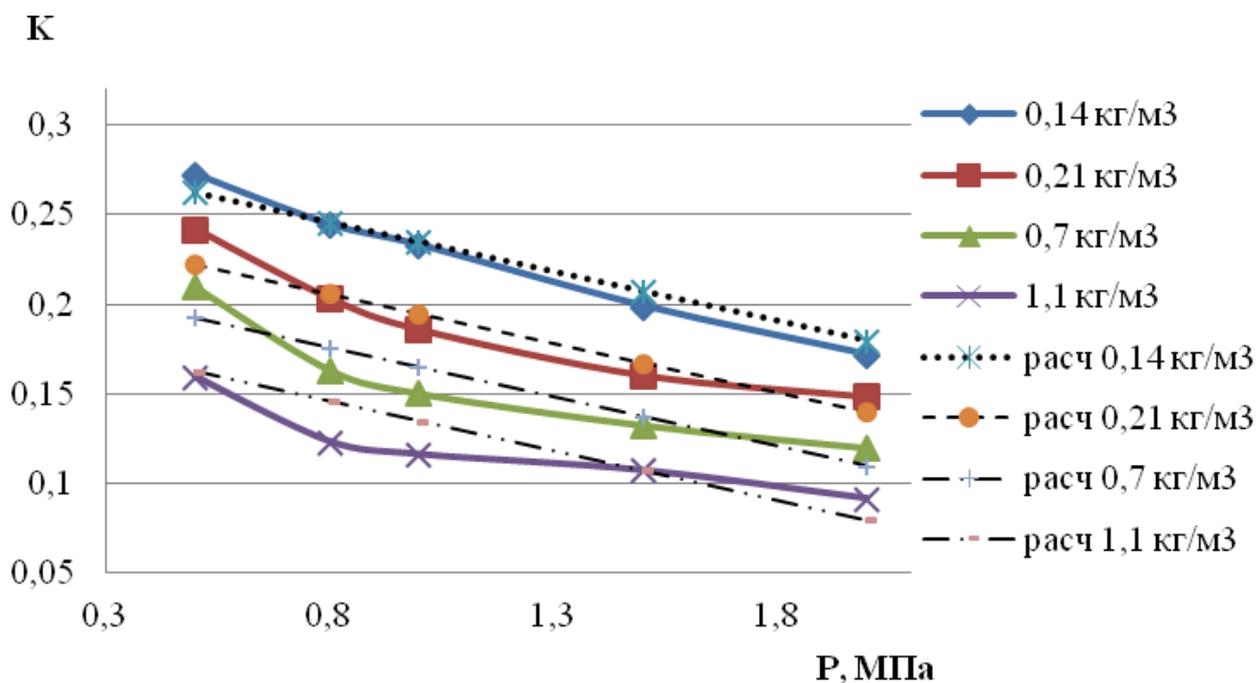


Рис. 3.16. Зависимость коэффициента задержания (K) солей от давления (P , МПа) при различных концентрациях солей для ультрафильтрационной мембраны УАМ-150.

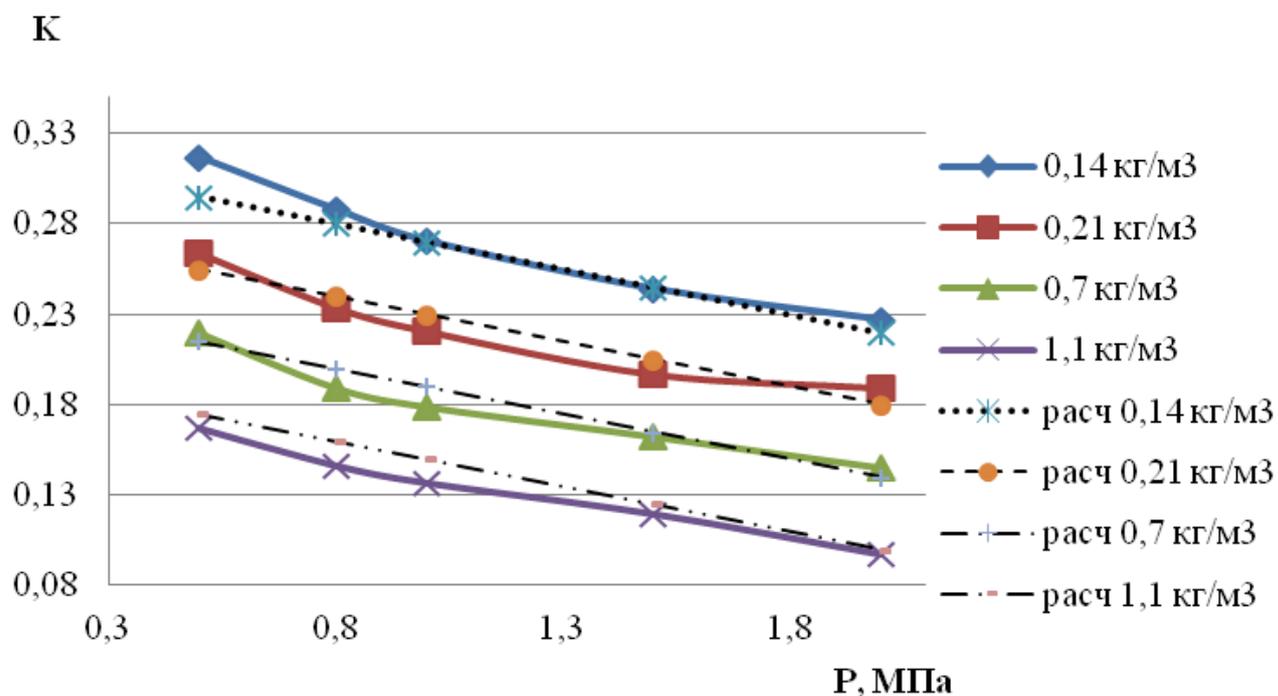


Рис. 3.17. Зависимость коэффициента задержания (K) солей от давления (P , МПа) при различных концентрациях солей для ультрафильтрационной мембраны УПМ-100.

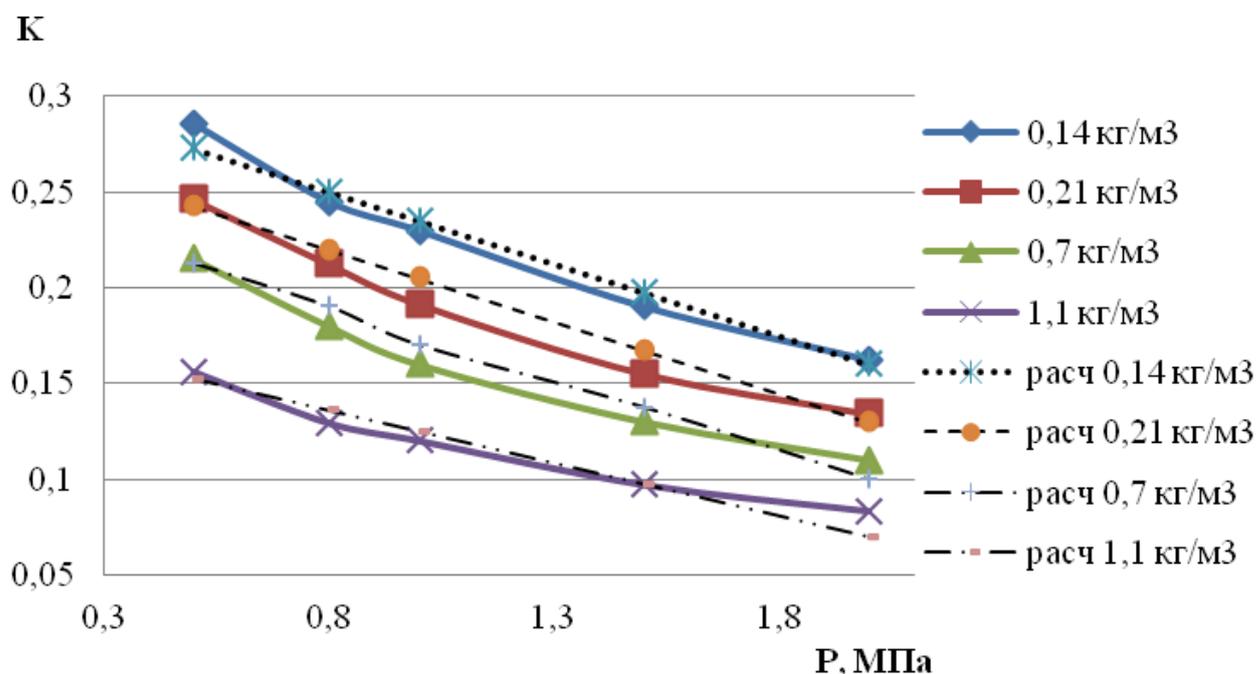


Рис. 3.18. Зависимость коэффициента задержания (K) солей от давления (P , МПа) при различных концентрациях солей для ультрафильтрационной мембраны УПМ-К.

Из приведенных зависимостей видно, что ультрафильтрационный процесс обеспечивает достаточную степень концентрирования сывороточных белков, однако необходима дополнительная стадия обработки сывороточного концентрата, для извлечения избытка минеральных солей. Кроме того, видно, что с увеличением концентрации растворенных веществ возрастает значение приграничных диффузионных слоев и усиливается явление концентрационной поляризации [57,82, 117].

Аналитически значения коэффициента задержания по белку и солям можно получить из формулы Б.В. Дерягина и др.:

$$K = 1 - \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{k_p k_1} - 1 \right) \left[1 - \exp \left(- \frac{J k_p k_2}{D} \right) \right] \cdot \exp(-J k_3)}, \quad (3.5)$$

где k_1, k_2, k_3 – эмпирические коэффициенты; k_p – коэффициент распределения мембран; D – коэффициент диффузии, m^2/s .

Таблица 3.3. – Значения эмпирических коэффициентов для уравнения 3.5.

Мембрана	Белок			Соли		
	k_1	k_2	k_3	k_1	k_2	k_3
УАМ-150	0,12770	1,00267	1,00557	0,55001	1,00777	1,00388
УПМ-100	0,12896	1,00751	1,00434	0,47144	1,00123	1,00562
УПМ-К	0,13358	1,00430	1,00812	0,42493	1,00651	1,00099

Отклонение расчетных значений коэффициента задержания от экспериментальных данных не превышает 10%.

3.4 Экспериментальное определение характеристик электрических импульсов

Было предположено, что наложение электрического поля позволит снизить коэффициент задержания солей ультрафильтрационными мембранами, исключив необходимость дополнительной деминерализации сывороточного концентрата [39]. Однако, за счет прохождения

электрического тока через мембранный аппарат с раствором происходит нагревание сырья, что ускоряет деятельность бактерий и ведет к нежелательному брожению сыворотки. Кроме того, окисляющее действие электрического тока может привести к свертыванию белковых молекул [75, 71].

Для снижения негативных эффектов [118] наложение электрического поля было предложено осуществлять импульсами. При этом выбор оптимальных характеристик электрического импульса производился экспериментально по косвенному показателю – интенсивности слоя окисленного сырья на поверхности электрода по истечении 2 часов проведения процесса. Период подачи импульса t , с в эксперименте чередовался равным по величине периодом отсутствия импульса. Подаваемый импульс варьировался по величине плотности тока i , А/м².

Влияние плотности тока и периода наложения электрического импульса на окисление молочного сырья оценивалось визуально по образованию на электродах окисленного слоя по истечении 2 часов проведения ультрафильтрационного процесса. Можно выделить три основных степени интенсивности окисленного слоя – слабый, средний и сильный (рис. 3.19).

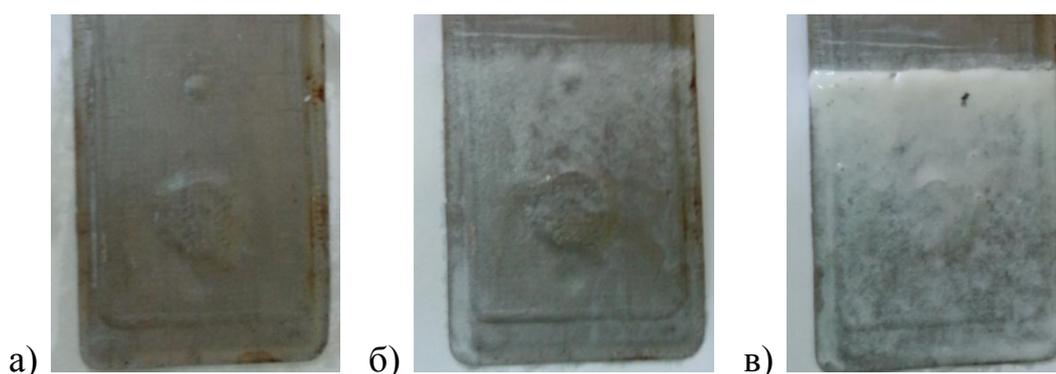


Рис.3.19. Интенсивность образование окисленного слоя на электроде (анод) под воздействием электрического тока: а – слабая, б – средняя, в – сильная.

Результаты экспериментальных исследований окисления молочного сырья при различных плотностях тока и периодах электрических импульсов представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.4. – Зависимость интенсивности окисленного слоя от плотности тока (i , A/m^2) и периода воздействия (t , с).

t , с	i , A/m^2				
	25	50	75	100	125
непрерывн.	слабый (а)	средний (б)	сильный (в)	сильный (в)	сильный (в)
0,5	слабый (а)	слабый (а)	средний (б)	сильный (в)	сильный (в)
1	слабый (а)	слабый (а)	слабый (а)	слабый (а)	средний (б)
2	слабый (а)	слабый (а)	слабый (а)	слабый (а)	слабый (а)

По полученным данным, оптимально использование периода импульсов равного 1 с при плотностях тока 75 - 100 A/m^2 [119].

3.5 Исследования коэффициентов задержания с наложением электрических импульсов

Для выбранного периода наложения электрических импульсов были получены экспериментальные зависимости коэффициента задержания мембранами минеральных солей от плотности тока и концентрации в растворе (рис. 3.20 – 3.22).

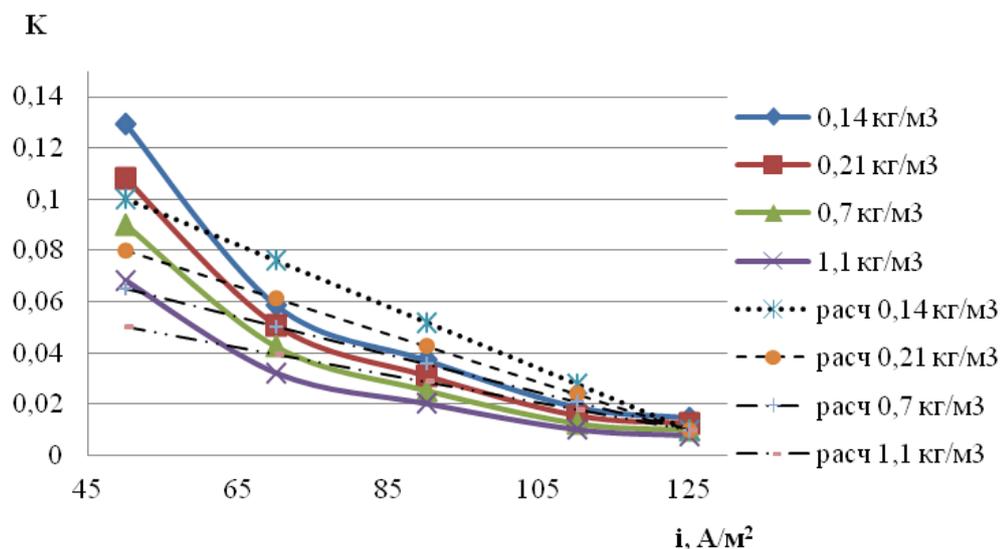


Рис. 3.20. Зависимость коэффициента задержания (K) солей от плотности тока (i , A/m^2) при $P= 1,0$ МПа и различных концентрациях солей для ультрафильтрационной мембраны УАМ-150.

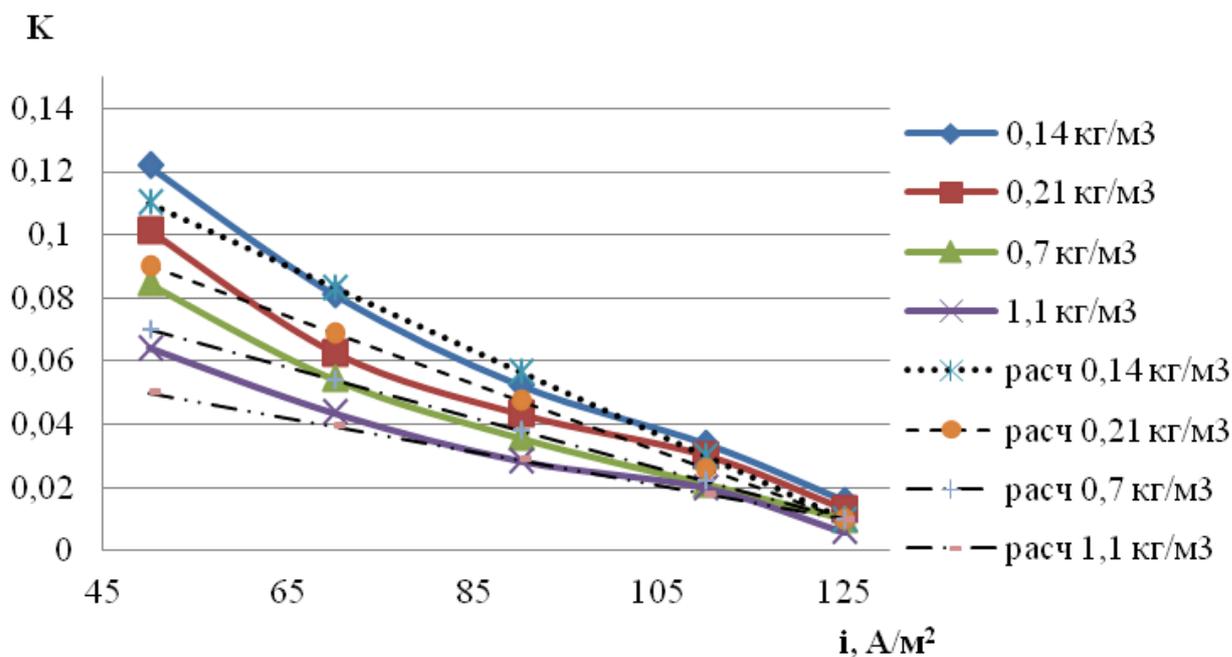


Рис. 3.21. Зависимость коэффициента задержания (K) солей от плотности тока (i , A/m²) при $P= 1,0$ МПа и различных концентрациях солей для ультрафильтрационной мембраны УПМ-100.

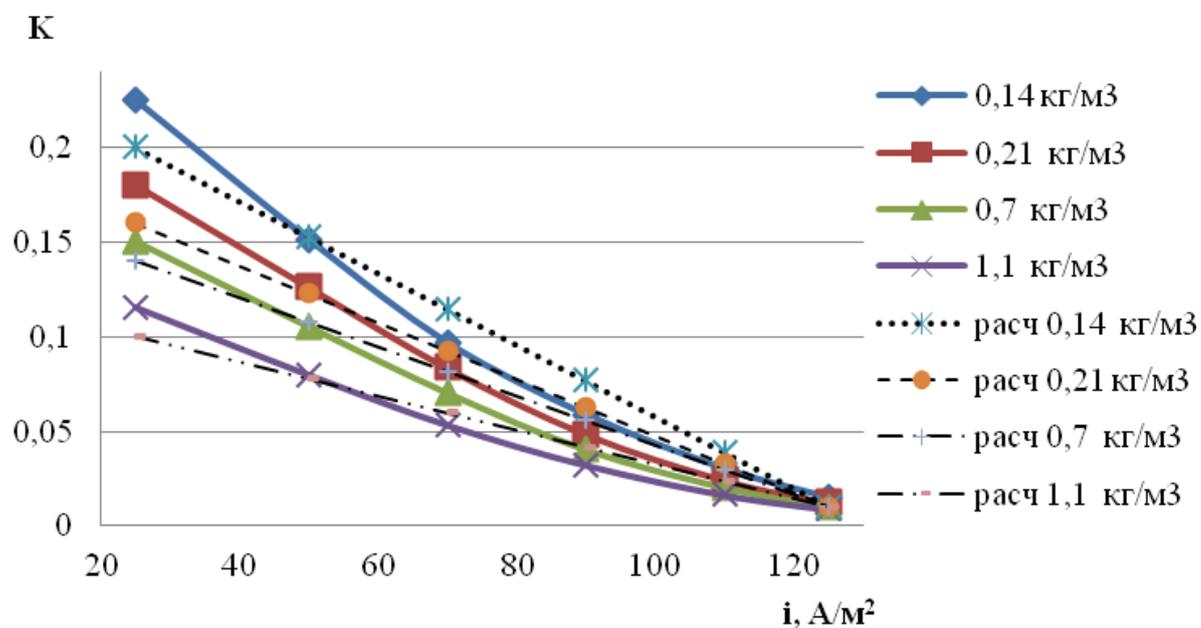


Рис. 3.22. Зависимость коэффициента задержания (K) солей от плотности тока (i , A/m²) при $P= 1,0$ МПа и различных концентрациях солей для ультрафильтрационной мембраны УПМ-К.

Наложение электрических импульсов, как видно из результатов экспериментальных исследований, снизило коэффициент задержания мембранами минеральных солей, что увеличило уровень деминерализации концентрата. Уровень деминерализации превысил 80%, что позволяет использовать получаемый концентрат в пищевых целях [120].

При наложении электрических импульсов на ультрафильтрационный процесс, минеральные соли, находящиеся в концентрате, диссоциируют на ионы. Ионы несут заряд определенного знака и устремляются к электроду, несущему противоположный заряд. При этом электрод находится с другой стороны ультрафильтрационной мембраны относительно концентрата. Таким образом, под действием электрического импульса, ионы минеральных солей извлекаются из концентрата и уносятся потоком пермеата.

При этом следует понимать, что скорость удаления различных ионов в таком процессе будет различной. Величина скорости будет зависеть от ионной подвижности и степени диссоциации минеральных солей. В первую очередь будут удаляться однозарядные ионы. Учитывая малый период наложения электрического импульса, можно предположить, что предлагаемая технология будет способствовать извлечению главным образом именно однозарядных ионов. Однако в совокупности с конвективным переносом молекул минеральных солей с потоком пермеата, рассматриваемый процесс обеспечивает необходимую степень деминерализации [40].

Для проверки влияния наложения электрических импульсов на характеристики концентрирования белков были проведены экспериментальные исследования зависимости коэффициента задержания мембранами белков от плотности тока и концентрации в растворе (рис. 3.23-3.25).

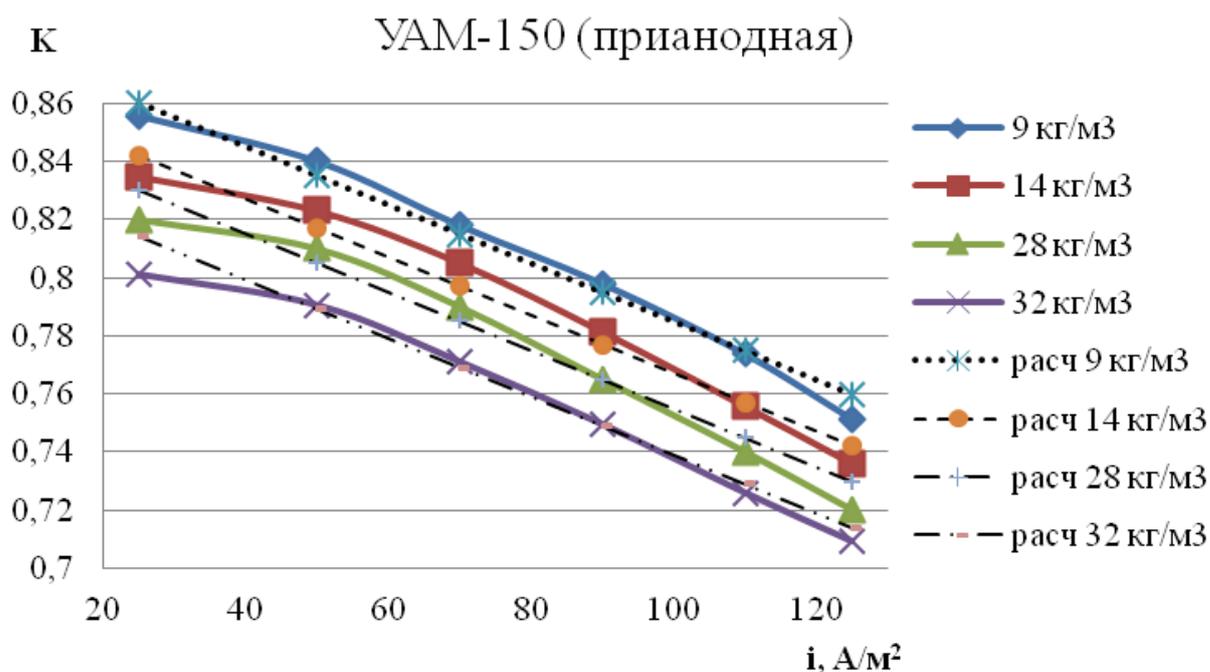
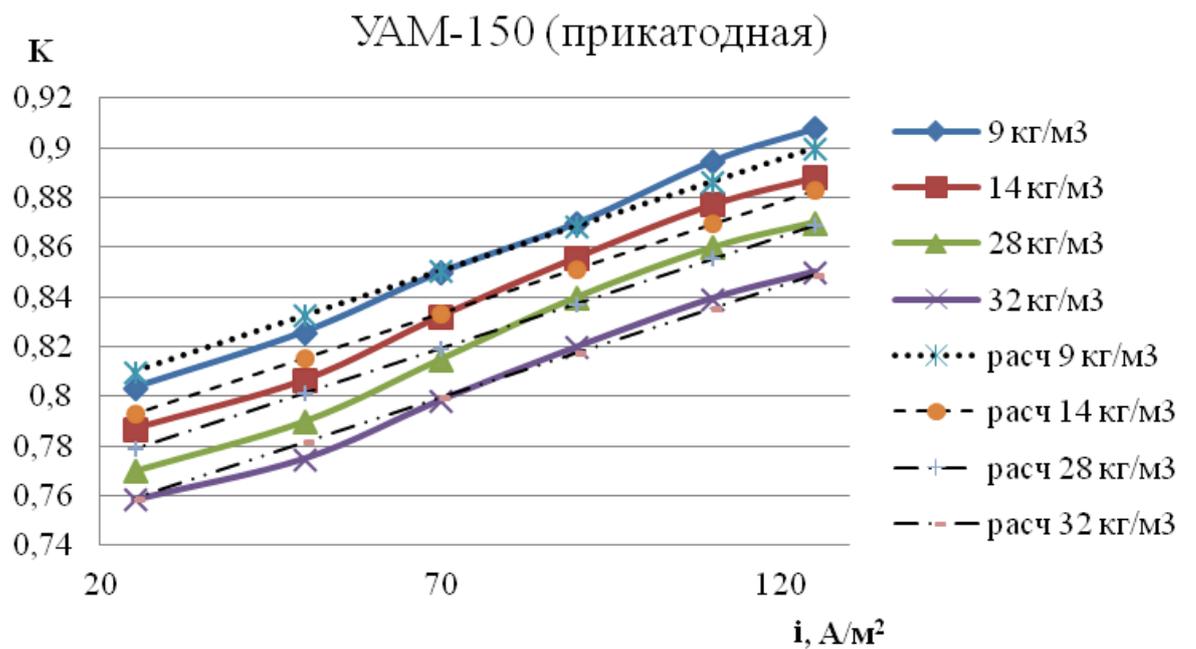


Рис. 3.23. Зависимость коэффициента задержания (K) белков от плотности тока ($i, \text{A/m}^2$) при $P= 1,0 \text{ МПа}$ и различных концентрациях белков для ультрафильтрационной мембраны УАМ-150 (прикатодной и прианодной).

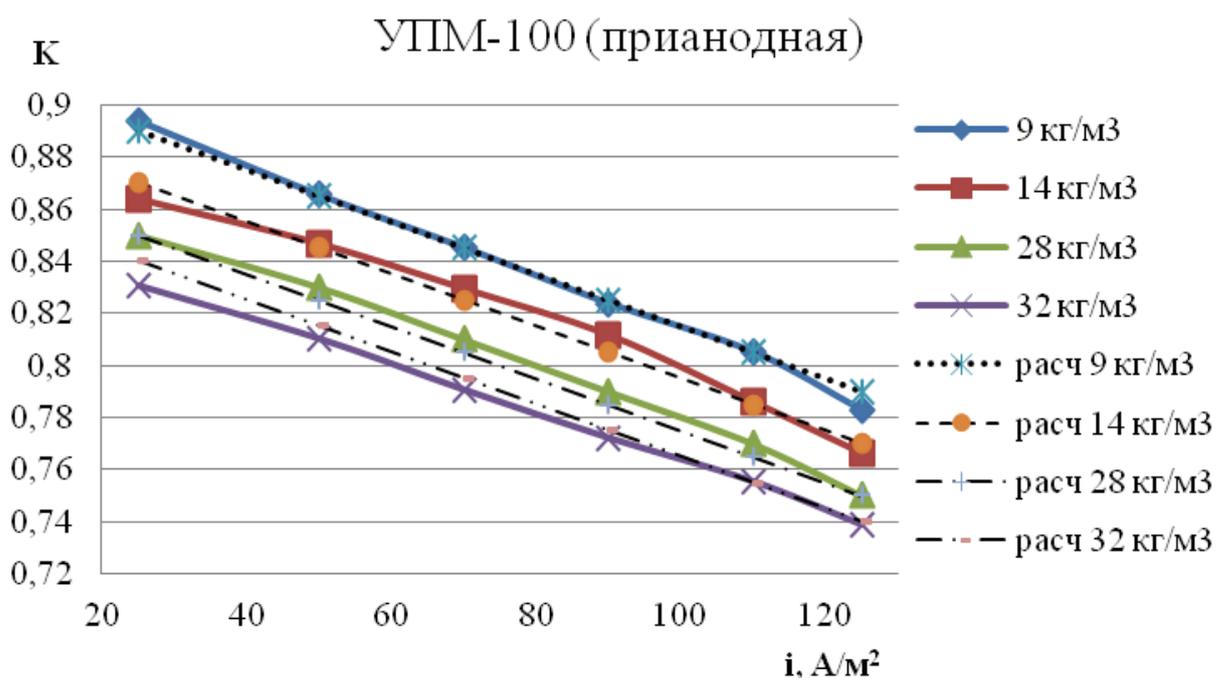
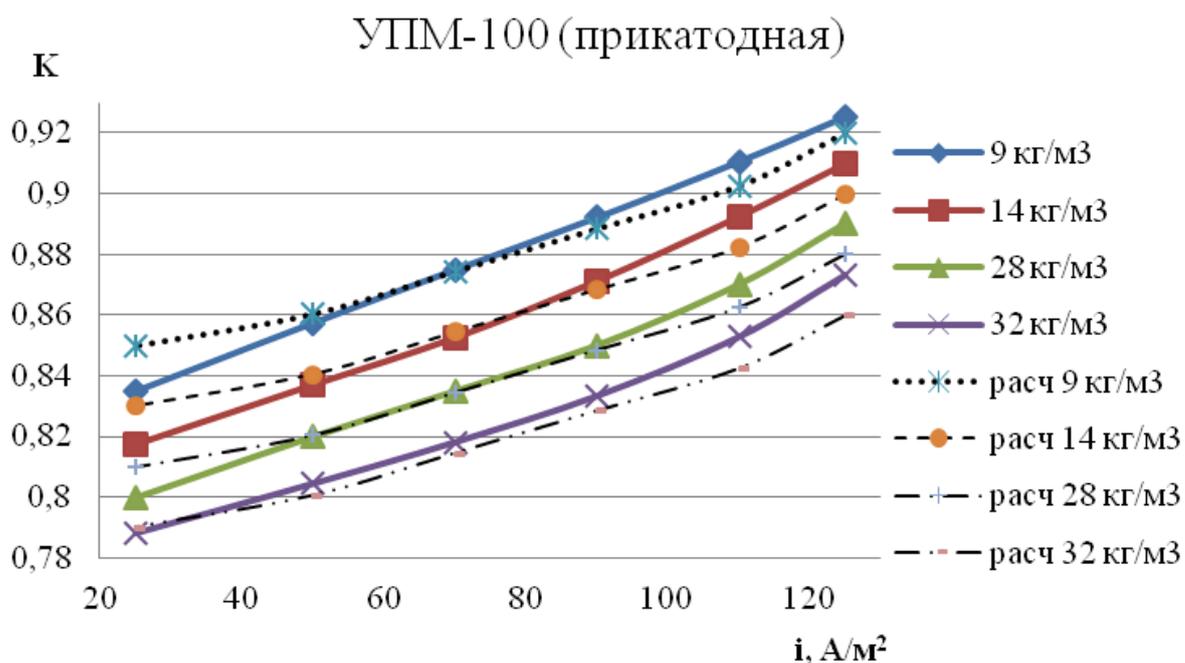


Рис. 3.24. Зависимость коэффициента задержания (K) белков от плотности тока ($i, \text{A}/\text{m}^2$) при $P=1,0$ МПа и различных концентрациях белков для ультрафильтрационной мембраны УПМ-100 (прикатодной и прианодной).

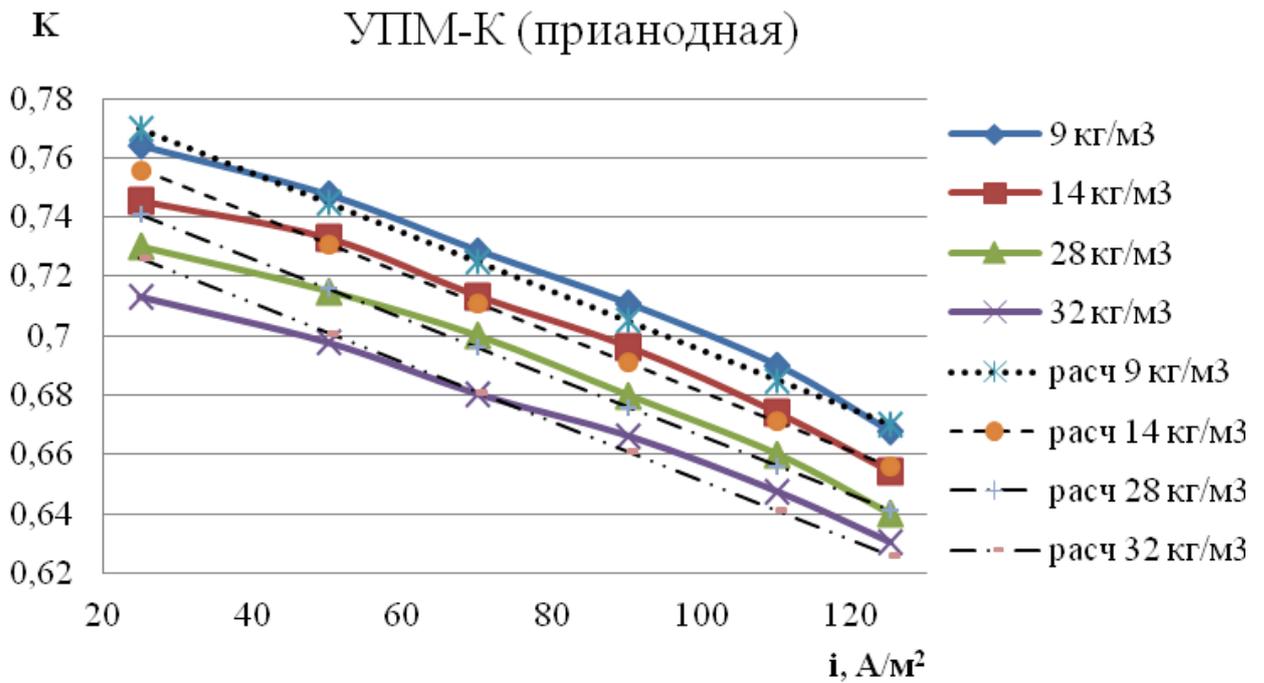
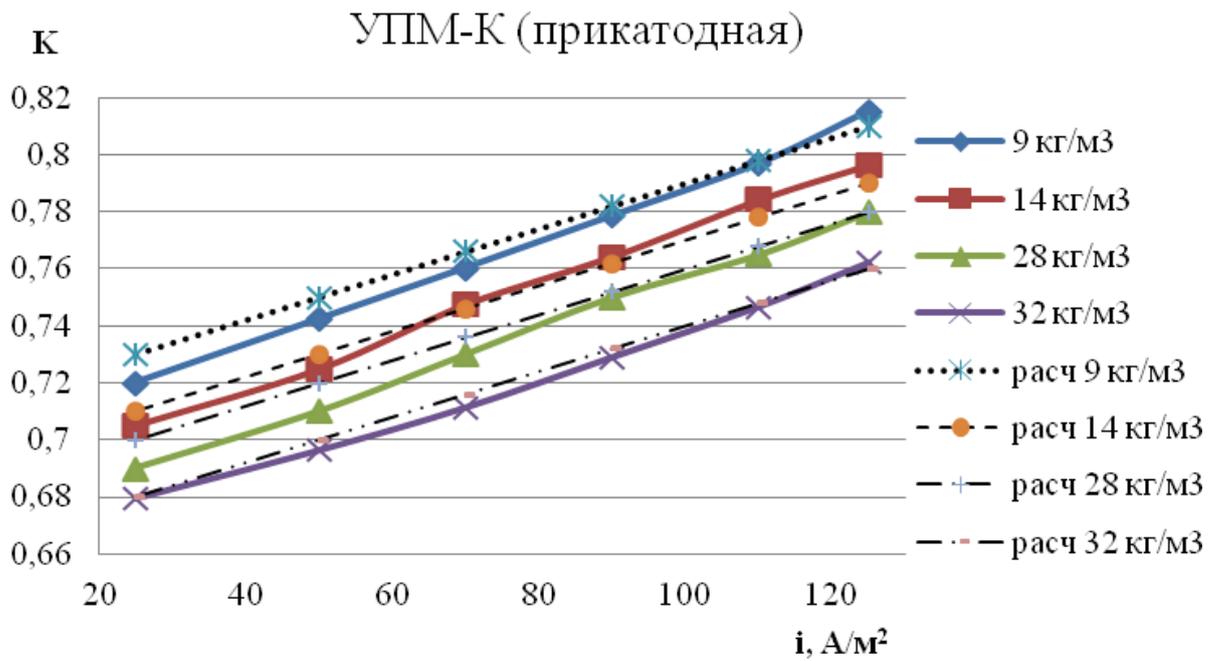


Рис. 3.25. Зависимость коэффициента задержания (K) белков от плотности тока ($i, \text{A/m}^2$) при $P= 1,0 \text{ МПа}$ и различных концентрациях белков для ультрафильтрационной мембраны УПМ-К (прикатодной и прианодной).

Согласно результатам экспериментальных исследований, наложение электрических импульсов с периодом 1 с увеличивает эффективность деминерализации концентрата в интервале плотностей тока 70 – 100 А/м². Наблюдаемые при этом коэффициенты задержания белка достаточны для эффективного концентрирования молочного сыря.

Из зависимостей, представленных на рисунках 3.23 – 3.25, видно, что при наложении электрических импульсов наблюдается различный характер кривой коэффициента задержания для прикатодных и прианодных мембран. Это обусловлено свойствами поляризационного слоя у поверхности мембран. При наложении разности потенциалов происходит диссоциация молекул находящихся в сыворотке веществ на ионы, и наблюдается обеднение поляризационного слоя у прикатодных мембран, и обратный процесс – у прианодных [40].

Расчет аналитических значений коэффициентов задержания при наложении электрических импульсов производился по модифицированной формуле Б.В. Дерягина и др.:

$$K = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{k_4 k_p} - 1 \right) \left[1 - \exp \left(- \frac{k_5 J k_p i \eta}{D k_p i \eta} \right) \right] \exp(-k_6 J)}, \quad (3.6)$$

где k_4 , k_5 , k_6 – эмпирические коэффициенты; i – плотность тока, А/м²; η – выход по току; D – коэффициент диффузии, м²/с.

Таблица 3.5. – Значения эмпирических коэффициентов для минеральных солей.

Мембрана	k_4	k_5	k_6
УАМ-150	0,04455	1,00045	1,00074
УПМ-100	0,05417	1,01009	1,00038
УПМ-К	0,03844	1,00099	1,00011

Таблица 3.6. – Значения эмпирических коэффициентов для белков.

Мембрана	k_4	k_5	k_6
УАМ-150 прикатодная	0,28131	1,2770602	1,00026
УАМ-150 прианодная	0,20342	1,2442922	1,00086
УПМ-100 прикатодная	0,20112	1,2967063	1,00085
УПМ-100 прианодная	0,14057	1,2485719	1,00076
УПМ-К прикатодная	0,48419	1,2485719	1,00021
УПМ-К прианодная	0,45136	1,00046	1,00100

Расхождения расчетных значений коэффициента задержания и полученных экспериментально значений коэффициента задержания не превышали 10 %.

3.6 Исследования удельного потока растворителя

Наряду с эффективностью мембранного процесса, большое значение имеет его производительность. Этот параметр оценивается величиной удельного потока растворителя через мембрану. Были проведены исследования удельного потока растворителя через ультрафильтрационные мембраны с наложением электрических импульсов (рис. 3.29 – 3.31) и без (рис. 3.26 – 3.28).

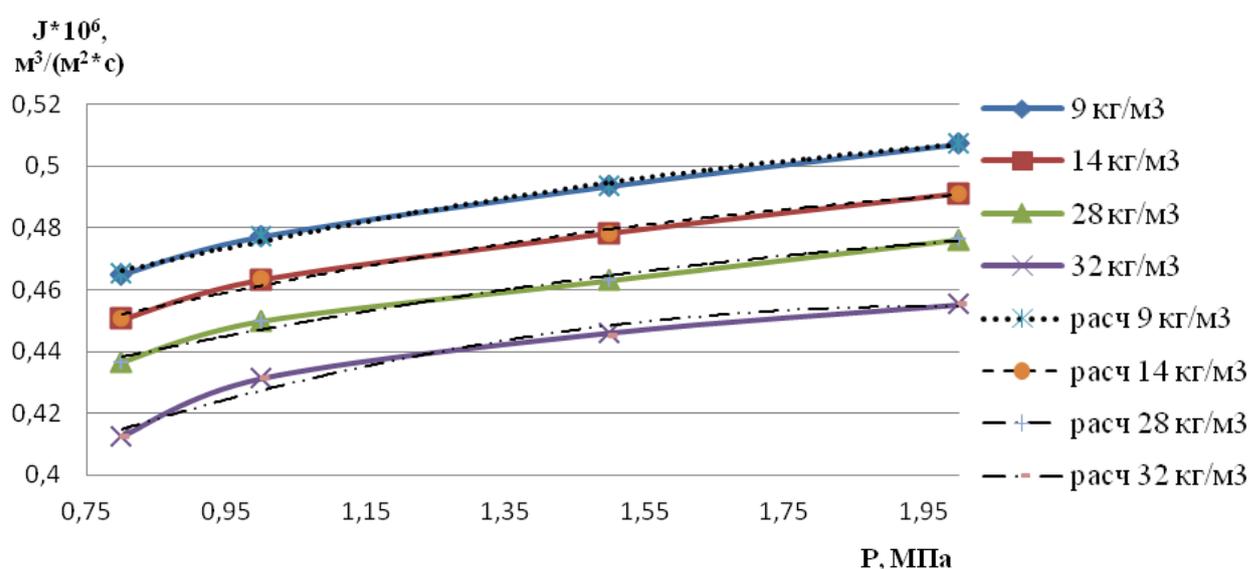


Рис. 3.26. Зависимость удельного потока растворителя (J , $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$) от давления (P , МПа) при различных концентрациях белков для ультрафильтрационной мембраны УАМ-150.

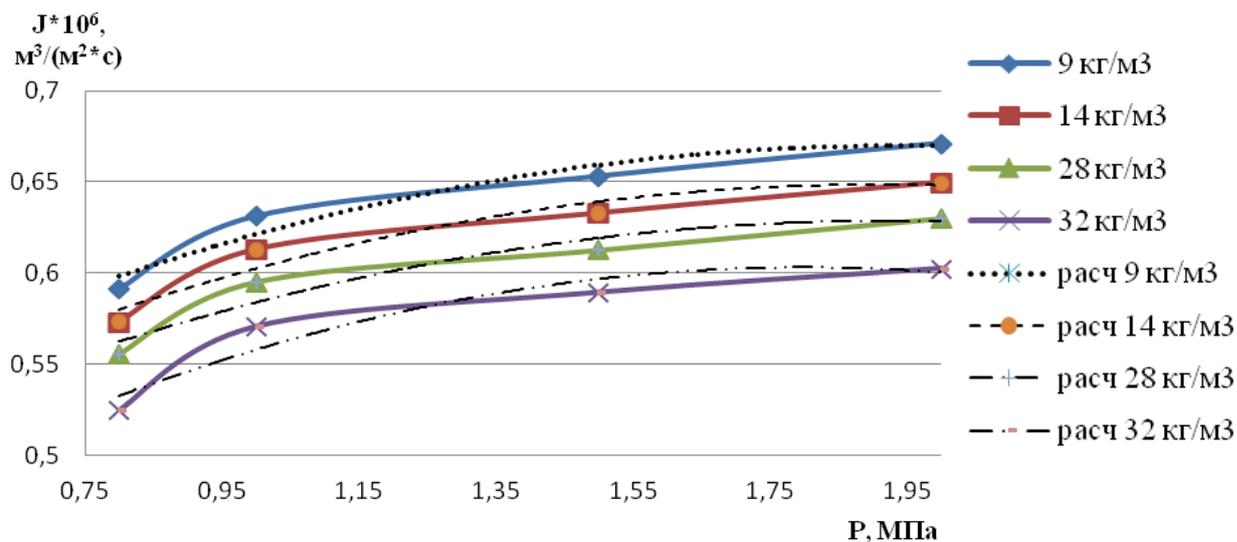


Рис. 3.27. Зависимость удельного потока растворителя (J , $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$) от давления (P , МПа) при различных концентрациях белков для ультрафильтрационной мембраны УПМ-100.

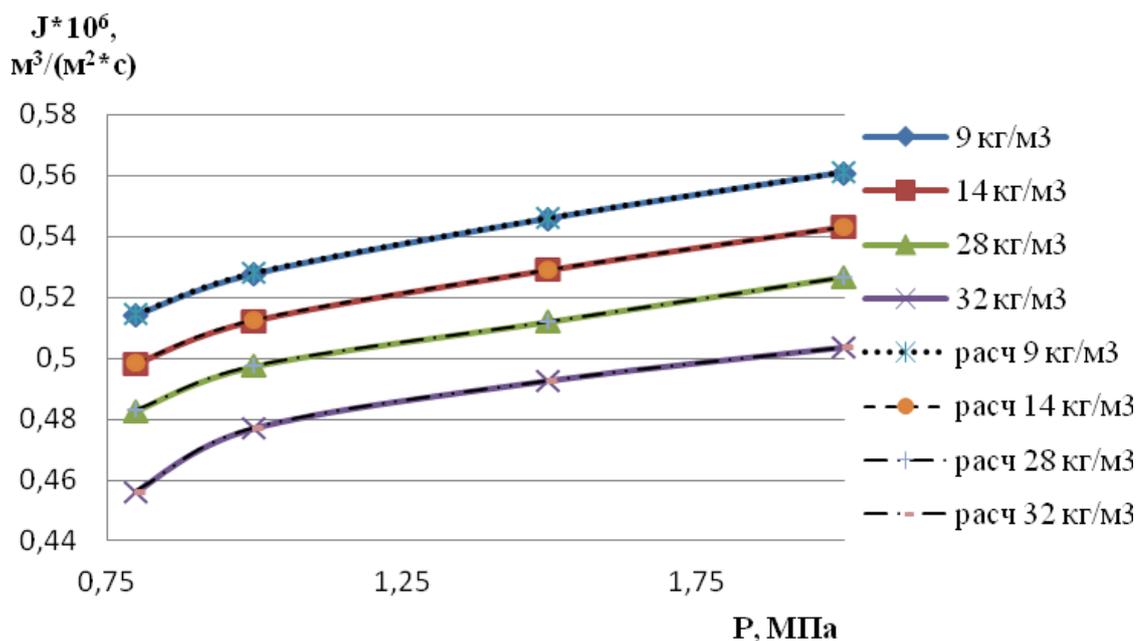


Рис. 3.28. Зависимость удельного потока растворителя (J , $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$) от давления (P , МПа) при различных концентрациях белков для ультрафильтрационной мембраны УПМ-К.

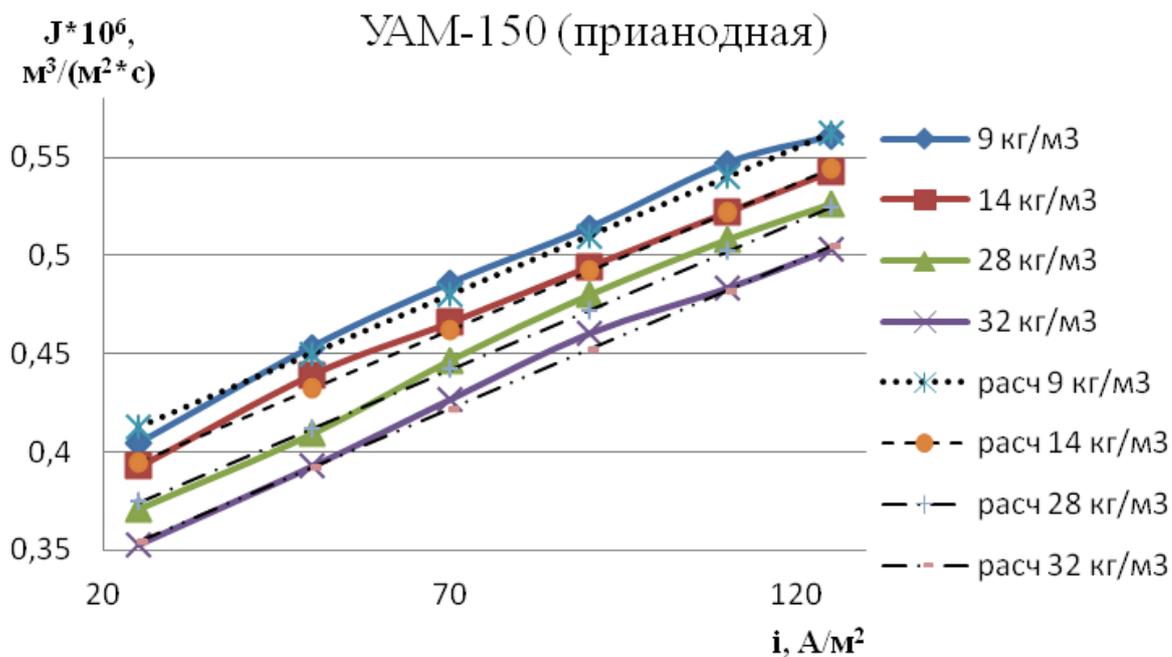
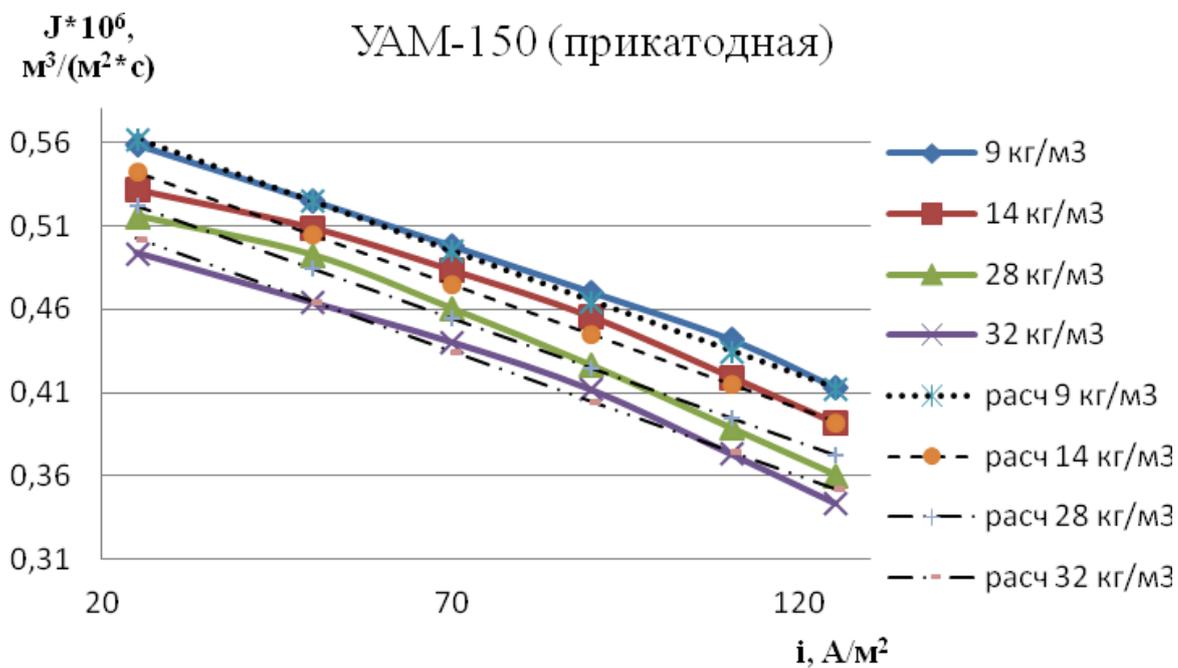


Рис. 3.29. Зависимость удельного потока растворителя ($J, \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$) от плотности тока ($i, \text{ А/м}^2$) при $P= 1,0 \text{ МПа}$ и различных концентрациях белков для прикатодной и прианодной ультрафильтрационной мембраны УАМ-150.

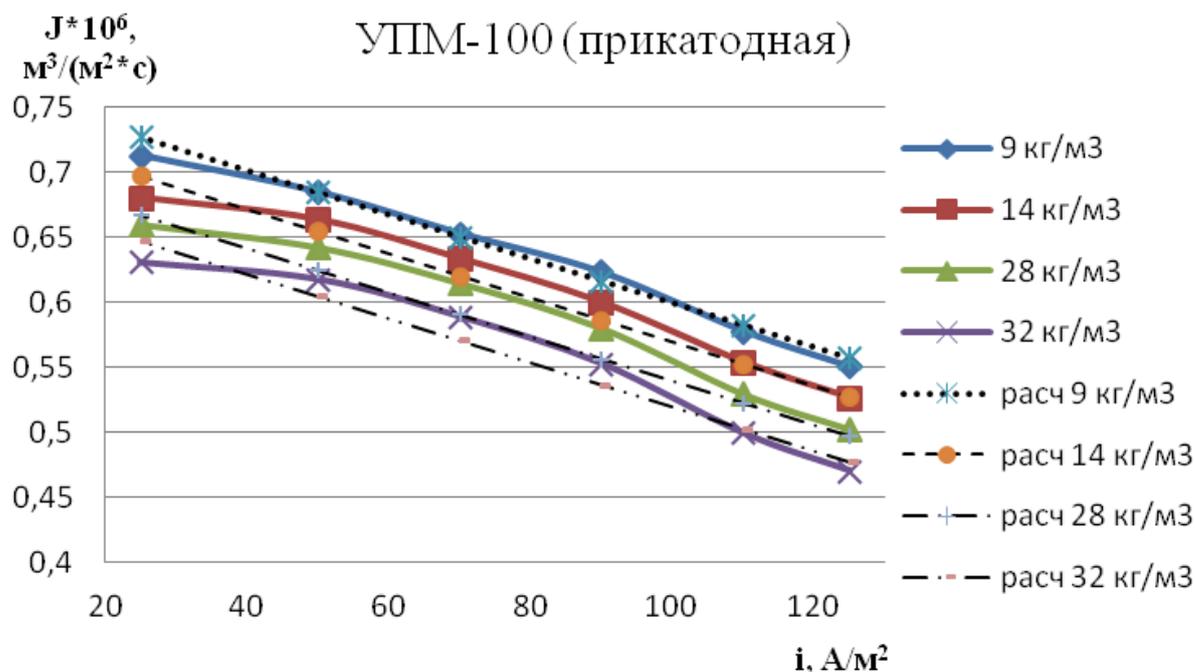


Рис. 3.30. Зависимость удельного потока растворителя (J , $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$) от плотности тока (i , $\text{А}/\text{м}^2$) при $P=1,0$ МПа и различных концентрациях белков для прикатодной и прианодной ультрафильтрационной мембраны УПМ-100.

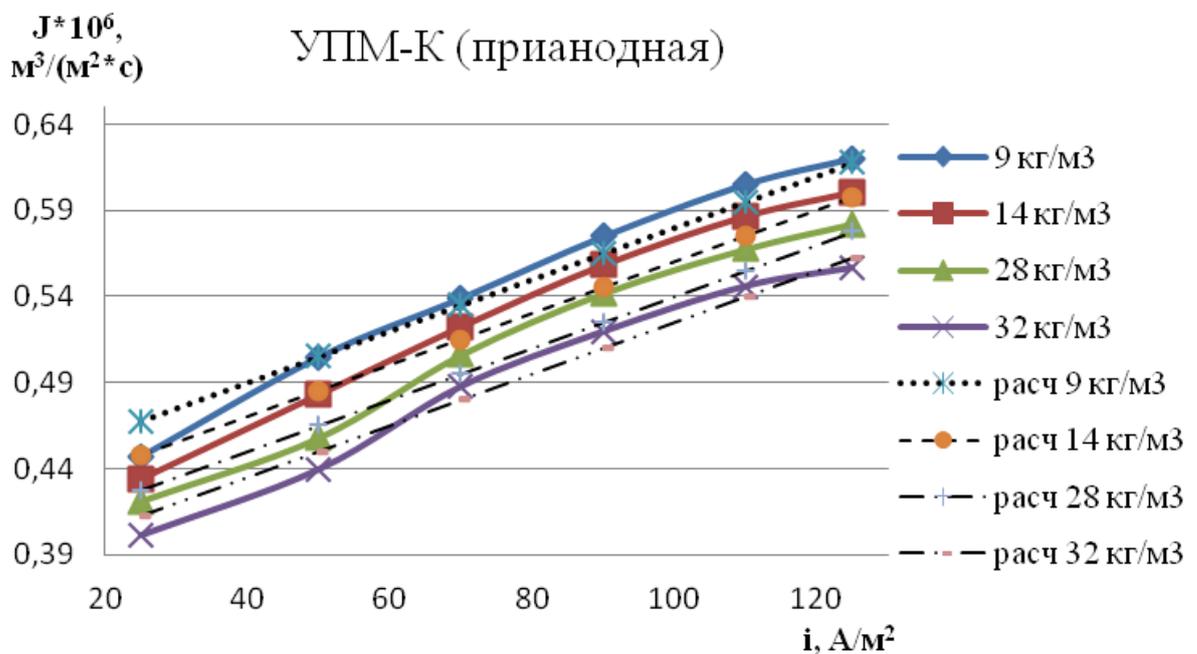
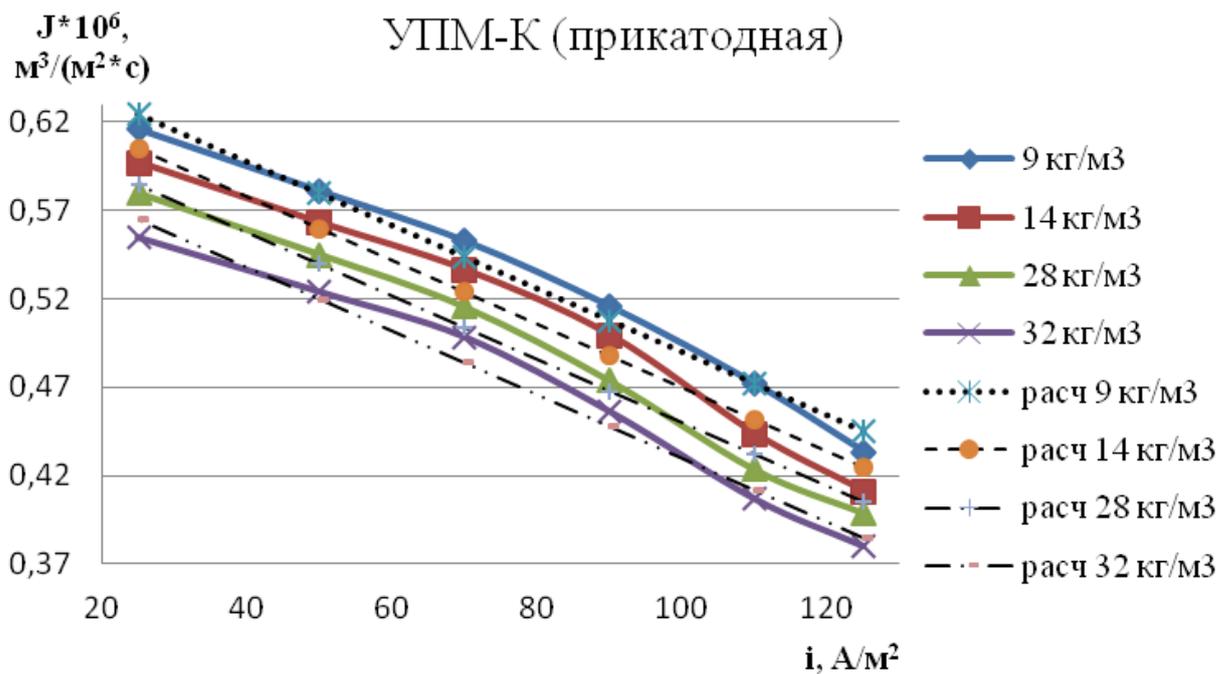


Рис. 3.31. Зависимость удельного потока растворителя ($J, \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$) от плотности тока ($i, \text{ А/м}^2$) при $P= 1,0 \text{ МПа}$ и различных концентрациях белков для прикатодной и прианодной ультрафильтрационной мембраны УПМ-К.

Из приведенных графиков видно, что для всех исследуемых образцов мембран с увеличением концентрации наблюдается снижение величины удельного потока растворителя. Это соотносится с общепринятыми представлениями и объясняется тем, что с ростом концентрации раствора возрастает интенсивность формирования пограничных концентрационных слоев [59], а также происходит закупорка и блокирование пор мембраны, что,

в конечном счете, приводит к снижению удельного потока растворителя. Важно заметить, что увеличение концентрации может приводить к образованию пространственных структур из ионов растворенного вещества в растворе и на поверхности мембран и уменьшению количества переносимого растворителя.

Рассматривая зависимости удельного потока растворителя от величины плотности тока электрического импульса можно отметить, что удельный поток растворителя ведет себя не однозначно. Различное поведение графика удельного потока растворителя для прикатодных и прианодных мембран объясняется различными величинами групп ионов различных зарядов.

Расчет величины удельного потока растворителя производился при помощи другого уравнения, основанного на законе Дарси:

$$J = k(\Delta P - (B_i \exp(n_i C_{исх}) \exp(A_i / T) i \eta)), \quad (3.7)$$

где B_i , n_i , A_i – эмпирические коэффициенты.

Таблица 3.7. – Значения эмпирических коэффициентов для уравнения 3.7 без наложения электрических импульсов.

Мембрана	B	n	A
УАМ-150	0,45806	0,00001	1,03157
УПМ-100	0,45811	0,00001	1,03160
УПМ-К	0,45809	0,00001	1,03161

Таблица 3.8. – Значения эмпирических коэффициентов для уравнения 3.7 с наложением электрических импульсов.

Мембрана	прианодная			прикатодная		
	B_i	n_i	A_i	B_i	n_i	A_i
УАМ-150	0,50011	0,68845	0,09578	0,55408	0,00197	0,99914
УПМ-100	0,32706	0,83962	0,09568	0,42118	0,00095	0,99835
УПМ-К	0,43996	0,29175	0,09573	0,52088	0,00065	0,99871

Расхождения расчетных значений удельного потока растворителя и полученных экспериментально значений удельного потока не превышали 10 %.

3.7 Выводы по третьей главе

1. Проведены и интерпретированы экспериментальные исследования технологических и кинетических характеристик процесса ультрафильтрационного концентрирования и деминерализации подсырной сыворотки. Проведены экспериментальные исследования по определению рациональных характеристик электрических импульсов.

2. Получены экспериментальные данные по коэффициенту задержания, удельному потоку растворителя, диффузионному потоку и коэффициенту распределения в зависимости от концентрации, температуры и величины импульса тока при ультрафильтрационном концентрировании белка и извлечении солей.

3. Обобщены и аналитически описаны аппроксимационными зависимостями результаты экспериментальных исследований. Получены численные значения эмпирических коэффициентов, позволяющие теоретически рассчитывать и в дальнейшем прогнозировать кинетику процесса, качество и производительность ультрафильтрационного концентрирования и деминерализации подсырной сыворотки с импульсным подводом тока.

4. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА УЛЬТРАФИЛЬТРАЦИОННОГО КОНЦЕНТРИРОВАНИЯ И ДЕМИНЕРАЛИЗАЦИИ ПОДСЫРНОЙ СЫВОРОТКИ

4.1 Построение математической модели процесса ультрафильтрационного концентрирования и деминерализации подсырной сыворотки

Для эффективной переработки вторичного молочного сырья необходимо получение высококонцентрированных продуктов мембранного процесса. Для этих целей в промышленности реализуют многоступенчатые мембранные процессы, либо организуют схемы мембранного концентрирования с замкнутой циркуляцией раствора [100, 101]. Поскольку процесс получения подсырной сыворотки является периодическим, то в данной работе нет необходимости рассматривать многоступенчатые мембранные системы непрерывного действия. В рамках данной работы рассматривается ультрафильтрационная установка с замкнутой циркуляцией раствора и наложением электрических импульсов. Рассмотрим плоскокамерную установку, состоящую из j камер разделения с замкнутой циркуляцией раствора по линии ретентата (рис 4.1).

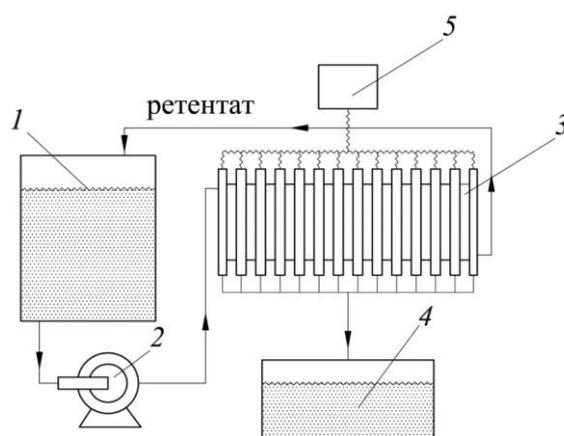


Рис. 4.1. Схема ультрафильтрационной установки с замкнутой циркуляцией раствора и наложением электрических импульсов.

1 – исходная емкость; 2 – насос; 3 – ультрафильтрационный аппарат с j камер разделения; 4 – емкость пермеата; 5 – источник электрических импульсов.

Рассматривая процессы, протекающие в данной установке, примем допущения [121, 122]:

1. существует равновесие фаз на границе раствора и мембраны;
2. насос обеспечивает постоянство подачи;
3. в емкости с раствором происходит идеальное смешение;
4. все неучтенные свойства мембран учитываются через коэффициенты задержания и водопроницаемости;
5. при наложении электрических импульсов время подачи тока равно времени отсутствия тока;
6. мембрана симметрично проницаема, т.е. проницаемость пор потоком со стороны активного слоя мембраны равна проницаемости при направлении потока со стороны подложки.

Основные составляющие массопереноса через мембрану представим на рис. 4.2. В данной модели мы ограничимся следующими основными потоками: $m_{кон}$ - конвективный поток растворенного вещества под действием приложенного к системе давления; $m_{диф}$ - диффузионный поток растворенного вещества за счет разницы концентраций по разные стороны мембраны [20]; $v_{кон}$ - конвективный поток растворителя под действием приложенного к системе давления; $v_{осм}$ - осмотический поток растворителя под действием разности осмотических давлений растворов по разные стороны мембраны. В момент наложения электрического импульса в системе возникают электрокинетические потоки растворителя и растворенного вещества под действием разности потенциалов, однако в рамках данной работы мы учтем эти потоки при определении коэффициентов массопереноса.

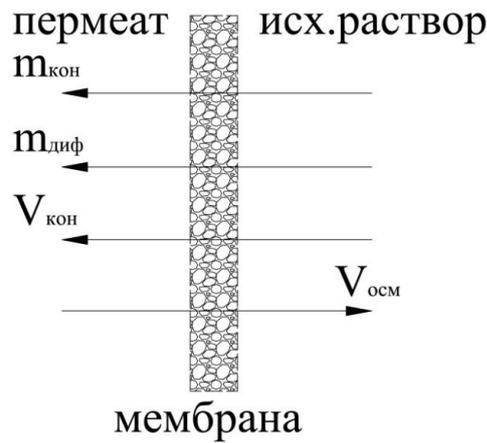


Рис. 4.2. Схема основных потоков массопереноса при ультрафильтрации.

Для составляющих массопереноса при ультрафильтрации можно записать следующие выражения:

диффузионный перенос вещества [89]

$$m_{\text{диф}} = \frac{P_{\delta}}{\delta} (C_{\text{рет}} - C_{\text{пер}}), \quad (4.1)$$

где P_{δ} – коэффициент диффузионной проницаемости, $\text{м}^2/\text{с}$; δ – толщина мембраны, м ; $C_{\text{рет}}$, $C_{\text{пер}}$ – концентрации растворенного вещества в ретентате и пермеате соответственно, $\text{кг}/\text{м}^3$.

конвективный перенос вещества – перенос с потоком растворителя

$$m_{\text{кон}} = k_{\text{кон}} \cdot v_{\text{кон}} \cdot C_{\text{рет}}, \quad (4.2)$$

где $k_{\text{кон}}$ – коэффициент полученный при наложении электрических импульсов и учитывающий их влияние; $v_{\text{кон}}$ – конвективный перенос растворителя, м^3 ; $C_{\text{рет}}$ – концентрация растворенного вещества в ретентате, $\text{кг}/\text{м}^3$.

конвективный перенос растворителя

$$v_{\text{кон}} = \alpha \cdot \Delta P, \quad (4.3)$$

где α – гидродинамическая проницаемость, полученная с учетом влияния наложения электрических импульсов на мембранную систему, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{Па})$.

осмотический перенос растворителя

$$v_{\text{осм}} = \alpha \cdot \Delta \pi; \quad (4.4)$$

где $\Delta \pi$ – разность осмотических давлений по обе стороны мембраны, Па .

В уравнение (4.4) для осмотического переноса растворителя введен коэффициент α и записано оно не через коэффициент осмотической проницаемости, получаемый экспериментальным путем [123], а через движущую силу осмотического потока – осмотическое давление. Экспериментальная величина осмотического давления взята из работы [124], и затем аппроксимирована в виде математической зависимости от концентрации белка.

Таким образом, введение в уравнение величины осмотического давления, для которого определена непосредственная зависимость от концентрации разделяемого раствора, позволило избавиться модель от коэффициента осмотической проницаемости, величину которого можно было получить только путем проведения дополнительных экспериментов.

Аппроксимируя полученные [124] зависимости осмотического давления молочной сыворотки от концентрации, получим выражение для нахождения π с доверительным интервалом 90%:

$$\pi = 1,0455^C - 0,9404, \quad (4.5)$$

где $1,0455$ и $0,9404$ – коэффициенты аппроксимации.

Тогда, учитывая что $\Delta\pi$ – разность осмотических давлений по обе стороны мембраны, можем записать (4.4) в виде:

$$v_{осм} = \alpha \cdot (1,0455^{C_{рет}} - 1,0455^{C_{пер}}) \quad (4.6)$$

Запишем суммарный поток массы через коэффициент задержания мембраны

$$M = m_{диф} + m_{кон} = \frac{P_{\delta}}{\delta} (C_{рет} - C_{пер}) + k_{кон} \cdot v_{кон} \cdot C_{рет} = (1 - K) C_{рет} v_{кон} \quad (4.7)$$

Примем следующие допущения:

$$\begin{aligned} C_{рет} &= 0,5(C_j^{ex} + C_j^{bix}); \\ C_{j-1}^{bix} &= C_j^{ex}; \\ V_{j-1}^{bix} &= V_j^{ex}. \end{aligned} \quad (4.8)$$

С учетом вышеописанного, для суммарных потоков массы (M) и растворителя (N) по j -ой камере можно записать:

по растворенному веществу

$$M = (C_j^{ex} + C_j^{6bx})(1 - K_j)\alpha_j \Delta P_j F_m \quad (4.9)$$

по растворителю

$$N = 2\alpha_j \Delta P_j F_m + 2\alpha_j (1,0455^{C_{pem}} - 1,0455^{C_{nep}}) F_m \quad (4.10)$$

Уравнение материального баланса по растворенному веществу для j -ой камеры примет вид [118]

$$V_j^{ex} C_j^{ex} d\tau - \sum m_j d\tau - V_j^{6bx} C_j^{6bx} = d(V_j C_j) \quad (4.11)$$

$$V_j^{ex} - \sum v_j = V_j^{6bx} \quad (4.12)$$

Выводим уравнение для расчета концентрации в пермеате

$$C_{nep} = \frac{M}{N} = \frac{0,5}{\alpha \cdot (\Delta P + 1,0455^{C_{pem}} - 1,0455^{C_{nep}})} \cdot [(1 - K_j) \cdot (C_j^{ex} + C_j^{6bx}) \cdot \alpha_j \cdot \Delta P] \quad (4.13)$$

Учитывая допущение о режиме идеального смешения в емкости, составим для нее материальные балансы:

по растворенному веществу

$$V_{pem}^{6bx} \cdot C_{pem}^{6bx} \cdot d\tau = d(C_1^{ex} \cdot V_1) + C_1^{ex} \cdot V_1^{ex} d\tau \quad (4.14)$$

по объемному расходу раствора

$$V_{pem}^{6bx} d\tau = dV_E + V_1^{ex} d\tau \quad (4.15)$$

Из уравнений (4.14) и (4.15) получим

$$V_E \cdot \frac{dC_1^{ex}}{d\tau} = V_{pem}^{6bx} \cdot (C_{pem}^{6bx} - C_{pem}^{ex}) \quad (4.16)$$

Учитывая, что

$$V_{pem}^{6bx} = V_1^{ex} - \sum_{j=1}^j N_j \quad (4.17)$$

выражение (4.15) запишем в виде

$$\frac{dV_E}{d\tau} = - \sum_{j=1}^j N_j \quad (4.18)$$

Принимаем, что $\sum_{j=1}^j N_j \neq f(\tau)$ и интегрируя, получим

$$V_E = V_{E0} - \tau \cdot \sum_{j=1}^j N_j \quad (4.19)$$

Подставив в (4.16) и сделав преобразования, получим

$$\frac{dC_1^{ex}}{d\tau} = z(\tau) \cdot (C_{perm}^{6blx} - C_1^{ex}), \quad (4.20)$$

$$\text{где } z(\tau) = \frac{V_1^{ex} - \sum_{j=1}^j N_j}{V_{E0} - \tau \cdot \sum_{j=1}^j N_j}$$

Таким образом, получены уравнения, позволяющие определить изменение концентраций растворенного вещества в пермеате и концентрате с течением времени для каждой камеры ультрафильтрационного аппарата, а также величины объемных расходов пермеата и текущего объема раствора в емкости. Полученная система уравнений является замкнутой.

$$\left\{ \begin{array}{l} dC_j^{6blx}/d\tau + dC_j^{ex}/d\tau = \varepsilon \cdot \left[(V_1^{ex} - \sum_{j=1}^{n-1} N_j) - 2L \right] C_j^{ex} - \\ - \varepsilon \cdot \left[(V_1^j - \sum_{j=1}^n N_j) + 2L \right] C_j^{6blx}, \\ dC_j^{ex}/d\tau = z(\tau) \cdot (C_j^{6blx} - C_j^{ex}), \\ C_{nep} = R_j \cdot (C_j^{ex} - C_j^{6blx}), \\ C_{j-1}^{6blx} = C_j^{ex}, \\ C_j^{ex}(0) = C_j^{6blx}(0) = C_0. \end{array} \right. \quad (4.21)$$

где $j = 1, 2, 3, \dots, n$, $\sum_{j=1}^{n-1} N_j = 0$; $N = 2\alpha_j F_m (\Delta P_j + 1,0455^{C_{perm}} - 1,0455^{C_{nep}})$; $\varepsilon = \frac{2}{F_m \chi}$;

$$L = 0,5\alpha_j (1 - K_j) \Delta P F_m; \quad z(\tau) = \left(V_1^{ex} - \sum_{j=1}^n N_j \right) / \left(V_{E0} - \tau \sum_{j=1}^n N_j \right);$$

$$R_j = \left[(1 - K_j) \alpha_j \Delta P_j \right] / \left[\alpha_j (\Delta P_j + 1,0455^{C_{perm}} - 1,0455^{C_{nep}}) \right].$$

На основе предложенной модели разработана программа для ЭВМ, свидетельство о регистрации № 2015614888 [6].

4.2 Проверка адекватности модели

Проверка адекватности предложенной математической модели проводилась средствами имитационного моделирования. На основе предложенной модели была разработана программа для ЭВМ, реализующая расчет основных характеристик ультрафильтрационного процесса концентрирования подсырной сыворотки. Программа разработана в среде Turbo C++ 4.0 64Bit Version, на персональном компьютере ASUS U36S, на базе процессора Intel Core i3, под управлением операционной системы Windows 7 Basic.

В программе были заданы параметры и условия ультрафильтрационных процессов, реализованных ранее в лабораторных условиях. Полученные в результате расчета значения коэффициента задержания сывороточных белков ультрафильтрационными мембранами УАМ-150, УПМ-100 и УПМ-К при различных концентрациях исходного раствора были сопоставлены с результатами расчета (рис. 4.3 – 4.5).

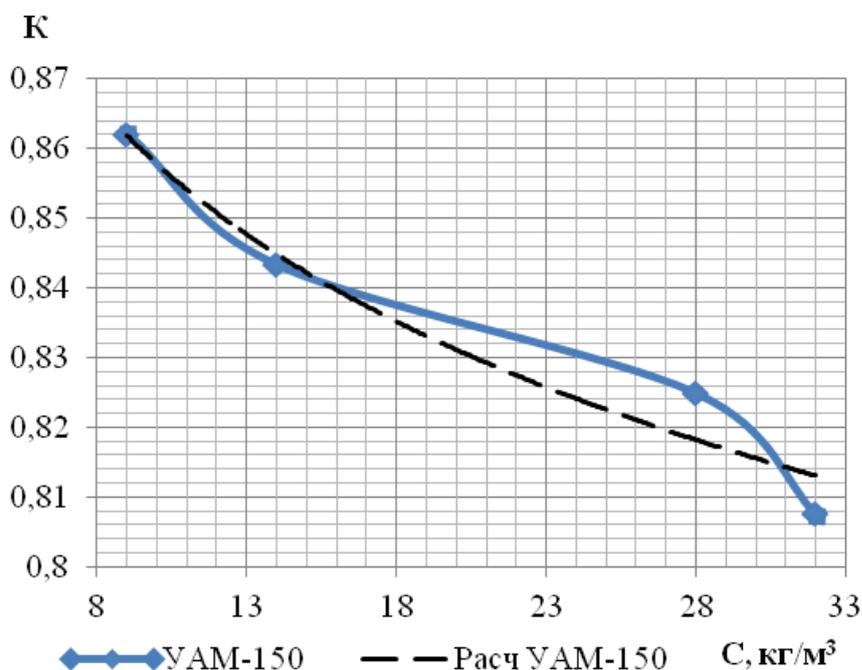


Рис. 4.3. График зависимости коэффициента задержания сывороточных белков (экспериментального и расчетного) ультрафильтрационной мембраной УАМ-150 от концентрации исходного раствора.

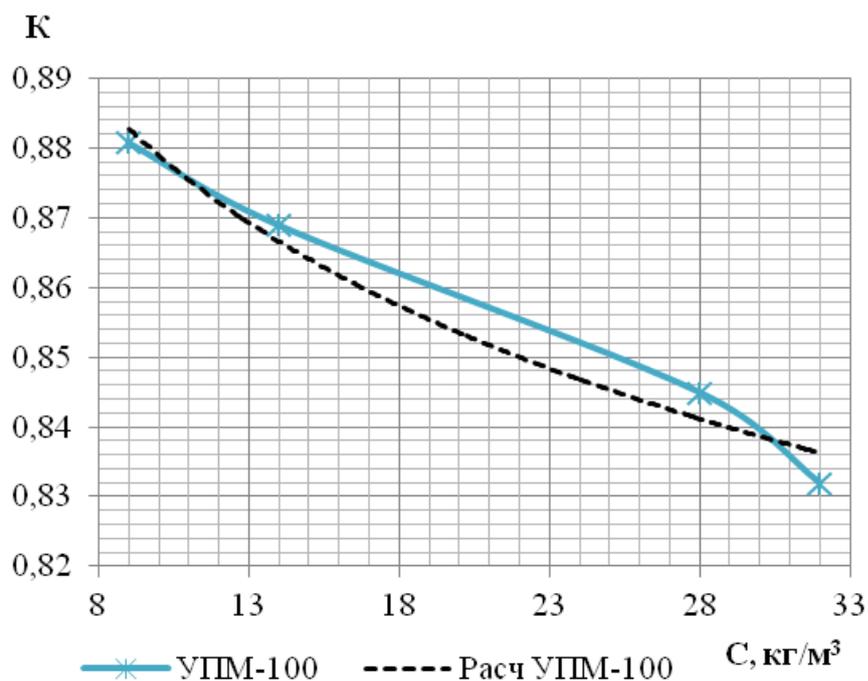


Рис. 4.4. График зависимости коэффициента задержания сыывороточных белков (экспериментального и расчетного) ультрафильтрационной мембраной УПМ-100 от концентрации исходного раствора.

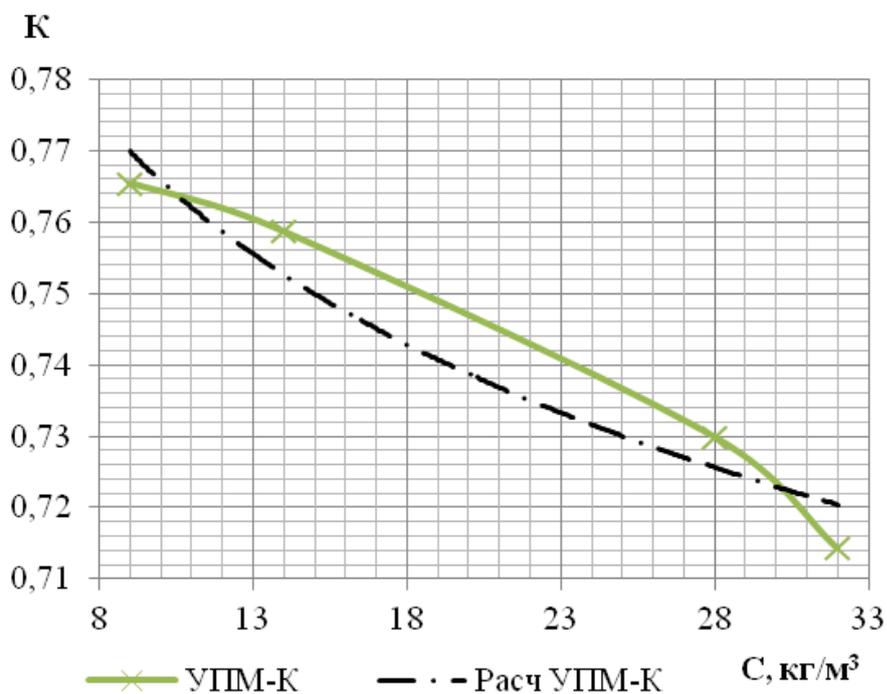


Рис. 4.5. График зависимости коэффициента задержания сыывороточных белков (экспериментального и расчетного) ультрафильтрационной мембраной УПМ-К от концентрации исходного раствора.

Для проверки адекватности математической модели ультрафильтрационного концентрирования с наложением электрических импульсов был произведен расчет изменения коэффициента задержания на выходе из ультрафильтрационного аппарата в зависимости от концентрации белка в исходном растворе и сравнение с экспериментальными данными. Проверка адекватности производилась на ультрафильтрационных мембранах при температуре 28°C, давлении 1 МПа и с наложением импульса с плотностью тока 75 А/м² и периодом 1 с. Отклонения расчетных данных от экспериментальных не превысили 10%.

4.3 Расчет периода эффективной работы мембран

Существуют различные методики расчета различных элементов мембранных аппаратов, например [125 - 132], однако в условиях работы под воздействием физически активных сред максимальному воздействию подвержена мембрана. Под действием разделяемой среды происходит набухание материала мембраны, что значительно меняет его характеристики. При этом в процессе работы мембранной системы на мембрану действует избыточное давление P , вызывая прогиб мембраны в ячейки сетки-подложки (на примере разработанного нами аппарата с плоскими фильтрующими элементами – патент № 2532813 RU [3]), а также контакт мембраны с узлами сетки-подложки, что вызывает разрушающее воздействие контактных напряжений узлов сетки на поверхность мембраны. Поэтому одним из важнейших вопросов эксплуатации таких аппаратов является вопрос срока службы мембраны до ее разрушения [128, 130].

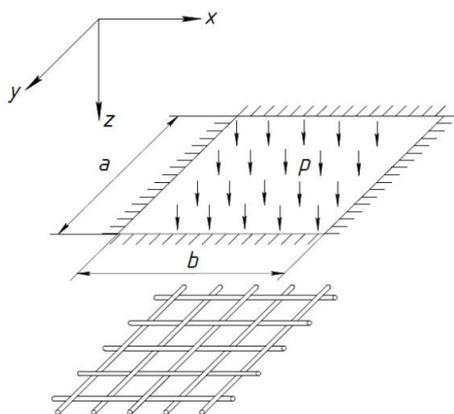


Рис. 4.6. Расчетная схема

Расчетная схема для определения срока службы мембраны, в условиях набухания, представлена на рисунке 4.6. Мембрана рассмотрена как плоская пластина ацетата целлюлозы, закрепленная по периметру и уложенная на металлическую проволочную сетку-подложку, узлы которой воздействуют на ее поверхность при прогибе под воздействием рабочего давления P .

Для расчета максимальных контактных напряжений определим силу, действующую на плоскую мембрану:

$$F = a \cdot b \cdot P, \quad (4.22)$$

где F – сила, действующая на мембрану, Н; a и b – длины сторон мембраны, мм; P – рабочее давление в системе, МПа.

Тогда распределенная нагрузка на проволоку:

$$q = \frac{F}{a}, \text{ если } a < b, \quad (4.23)$$

где q – распределенная нагрузка, Н/мм.

От соприкосновения с проволокой в мембране возникают контактные напряжения σ_{κ} [МПа], максимальное значение которых равно:

$$\sigma_{\kappa} = 0,564 \sqrt{\frac{\frac{q}{a \cdot R}}{\frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2}}}, \quad (4.24)$$

где R – радиус сечения проволоки, мм; μ_1 и μ_2 - коэффициент Пуассона для материала проволоки и мембраны соответственно; E_1 и E_2 – модуль Юнга для материала проволоки и мембраны соответственно, МПа.

Зная контактные напряжения σ_κ , можем найти время τ [сек.] до разрушения мембраны [133]:

$$\tau = \frac{\pi h^2}{4D\xi} \left(1 - \frac{\sigma_\kappa}{\sigma_p} \right)^2, \quad (4.25)$$

где h – толщина мембраны с учетом подложки, м; D – коэффициент диффузии разделяемой среды в материал мембраны, м²/с; ξ – коэффициент линейной аппроксимации; σ_p - напряжение разрушения материала мембраны, МПа.

Коэффициент линейной аппроксимации ξ может выбираться исходя из условий конкретной задачи. В данной работе коэффициент ξ принимался равным 0,9.

Коэффициент диффузии D разделяемой среды в материал мембраны характеризует набухание под действием физически активной среды [96]. Эта величина определяется экспериментальным путем для каждой пары мембрана – раствор.

Получаемые расчетным путем значения срока службы мембраны составляют для мембраны УАМ-150 при различных условиях 82 – 125 часов, что хорошо соотносится с экспериментами, приведенными в работе [124]. На основе предложенного расчета разработана программа для ЭВМ (свидетельство о регистрации № 2014615341) [5].

4.4 Выводы по четвертой главе

1. На основе балансных соотношений разработана математическая модель процесса ультрафильтрационного концентрирования и деминерализации подсырной сыворотки с учетом электрического импульса и величины осмотического давления раствора подсырной сыворотки, позволяющая рассчитывать значения концентрации и объемы пермеата и ретентата в промежуточных камерах и на выходе из плоскокамерного ультрафильтрационного аппарата. Проверена адекватность математической модели путем сравнения экспериментальных и расчетных кинетических зависимостей коэффициента задержания от концентрации белка в ультрафильтрационном процессе концентрирования подсырной сыворотки. Расхождение между экспериментальными и расчетными значения не превышало 10%.

2. Предложена методика расчета периода функционирования ультрафильтрационных мембран и элементов, позволяющая определять период времени эффективной реализации процесса концентрирования и деминерализации подсырной сыворотки. По разработанной методике расчетное время эффективной работы мембраны УАМ-150 при различных условиях процесса концентрирования и деминерализации составляет 82-125 часов.

5. ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОФОРМЛЕНИЕ ПРОЦЕССА УЛЬТРАФИЛЬТРАЦИОННОГО КОНЦЕНТРИРОВАНИЯ И ДЕМИНЕРАЛИЗАЦИИ ПОДСЫРНОЙ СЫВОРОТКИ

5.1 Разработка конструкции ультрафильтрационного аппарата плоскокамерного типа

Как отмечалось ранее, для получения сывoroточного белкового концентрата высокого качества, пригодного для применения в пищевой промышленности, согласно ГОСТ Р 53456-2009 «Концентраты сывoroточных белков. Технические условия» необходимо обеспечить уровень деминерализации не менее 80%. Достичь такого показателя деминерализации можно путем введения стадии электродиализной деминерализации в технологическую схему, однако при этом возрастают издержки и энергетические затраты.

Другой путь повышения эффективности переработки - совмещение процессов концентрирования сывoroтки и ее деминерализации в одном аппарате. Такое совмещение возможно в ультрафильтрационном аппарате с плоскими фильтрующими элементами, разработанном в рамках данной работы. В разработанном мембранном аппарате разделение совмещено с удалением минеральных солей под действием электрического поля, накладываемого импульсами (рис. 5.1) [3].

Следует учесть, что наложение на мембранные аппараты электрических полей влечет нагрев сывoroтки в процессе работы аппарата, за счет протекания по ней электрического тока. Учитывая нежелательность ускорения окислительных процессов в сывoroтке, такое нагревание необходимо предотвратить.

Для повышения эффективности процесса переработки аппарат предусматривает возможность эффективного охлаждения сывoroтки, концентрата и электродов аппарата. Разработанная конструкция аппарата позволяет эффективно осуществлять деминерализацию сывoroтки за счет

наложения электрических импульсов и непрерывно охлаждать раствор и электроды за счет циркуляции теплоносителя. На конструкцию данного аппарата получен патент № 2532813 RU [3].

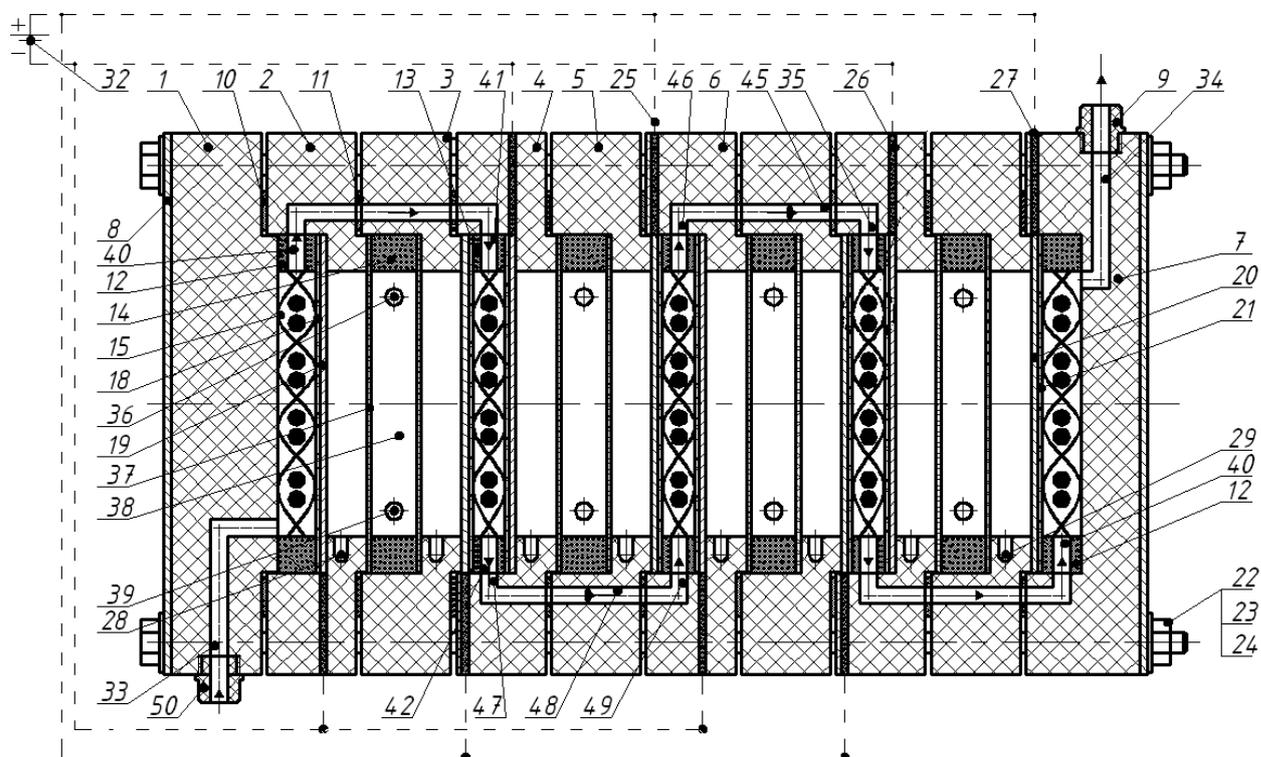


Рис. 5.1. Ультрафильтрационный аппарат с плоскими фильтрующими элементами.

1-7 – фланцы корпуса; 8 – металлическая пластина; 9, 50 – штуцер; 10 - 14 – прокладка; 15 – ионообменные спейсеры; 18, 21 – мембрана; 19, 20 – электрод; 22 – 24 – шпилька, гайка, шайба; 25 – провод; 26 – герметик; 27 – проточка; 28, 29, 33 - 36, 39 – 42, 45 – 49 – каналы; 32 – источник импульсов тока; 37 – полимерная перегородка; 38 – охлаждающая камера.

Исходный раствор поступает через штуцер 50 в канал ввода исходного раствора 33 и заполняет пространство, образованное первым фланцем корпуса аппарата 1 и прикатодной мембраной 18. Затем попадает через отверстие 40 в паронитовой прокладке 12 в отверстие 46 первой камеры корпуса 2. Далее через цилиндрическую проточку 45 второй камеры корпуса 3, через отверстие 35 в третьей камере корпуса 4 и отверстие 41 в верхней части паронитовой прокладки 13, раствор заполняет пространство между прианодной и прикатодной мембранами 21 и 18. Мембраны расположены

между второй и третьей камерами корпуса 3 и 4 и уложены с обеих сторон паронитовой прокладки 13. Через отверстие 42 в нижней части паронитовой прокладки 13, отверстие 47 в нижней части третьей камеры корпуса 4, цилиндрическую проточку 48 в нижней части четвертой камеры корпуса 5 и отверстие 49 в нижней части пятой камеры корпуса 6, раствор заполняет следующее межмембранное пространство. Аналогичным образом происходит заполнение всех межмембранных пространств. В каждом межмембранном пространстве расположены ионообменные спейсеры 15, состоящие из ионообменной сетки и гранул. После заполнения пространства, образованного прианодной мембраной 21 и вторым фланцем корпуса 7, раствор выводится через канал вывода раствора 34 и штуцер вывода раствора 9. В этот же момент времени к аппарату от источника импульсов тока 32 подводится импульсами внешнее электрическое поле с определенной плотностью тока. Под действием электрического тока анионы, проникающие через прианодную мембрану 21 и пористый-монополярный электрод 20, отводятся с прианодным пермеатом. Отвод осуществляется по каналу 29 в виде кислот через штуцер 31 прианодного пермеата. Прианодный пермеат соприкасается с диэлектрической пластиной 37, которая является стенкой охлаждающей камеры 38, отводя избыток тепла, образующегося при нагревании монополярных-пористых электродов, от прианодного пермеата. Катионы, проникающие через прикатодную мембрану 18 и пористый-монополярный электрод 19 отводятся с прикатодным пермеатом. Их отвод осуществляется по каналу 28 в виде оснований, через штуцер 30 прикатодного пермеата. Прикатодный пермеат соприкасается с диэлектрической пластиной 37, которая является стенкой охлаждающей камеры 38, отводя избыток тепла от прикатодного пермеата. Газы, образованные в результате электрохимических реакций в аппарате также отводятся через штуцера 30 и 31. Одновременно с заполнением аппарата исходным раствором охлаждающий агент подается через каналы штуцера 44 и по отверстиям 39 заполняет охлаждающие камеры 38 и, отводя избыток

тепла от пермеата, выводится через отверстия 36 и штуцера вывода охлаждающего агента 43.

Контакт прикатодного и прианодного пермеата с диэлектрическими пластинами 37 охлаждающей камеры 38 выполняется с целью отвода избытка тепла от пермеата, т.к. с увеличением времени работы аппарата с наложением электрического поля, возрастает температура поверхности электродов и мембран, негативно влияя на рабочие характеристики мембран. Кроме того, высокая температура способствует брожению биологически активных растворов, делая невозможным применение аппарата для их концентрирования.

Аппарат принят к применению при разработке технологических схем концентрирования промышленных растворов на ОАО «ТАГАТ» им. С.И. Лившица.

5.2 Методика расчета ультрафильтрационного аппарата для концентрирования и деминерализации подсырной сыворотки

Математическая модель определяет значения концентрации и объемы пермеата и ретентата в промежуточных камерах и на выходе из плоскокамерного ультрафильтрационного аппарата. Но при расчете технологических параметров плоскокамерных мембранных систем важным вопросом является определение таких параметров мембранных аппаратов, как рабочая площадь мембран, рабочее давление в разделительном элементе и расход энергии на ведение процесса разделения. Рассмотрим методику для расчета этих параметров.

Главным рабочим элементом мембранного аппарата является полупроницаемая мембрана. Выбор типа мембраны осуществляют исходя из следующих требований [30, 58]:

1. Максимальные величины удельного потока растворителя и коэффициента задержания. Значение удельного потока растворителя

характеризует производительность процесса, а коэффициента задержания – качество разделения.

2. В рамках данной работы помимо коэффициента задержания белков сыворотки большое значение имеет коэффициент задержания мембраной минеральных солей. Эта величина должна быть минимальной, чтобы обеспечить максимальный отвод минеральных солей с потоком пермеата.

3. Мембрана должна эффективно работать в широком диапазоне температур. Воздействие высоких температур, как правило, оказывает негативное влияние на срок службы мембран.

4. Мембрана должна обладать способностью эффективно работать в широком диапазоне рабочих давлений, т.к. экспериментальные исследования мембранного разделения конкретных промышленных растворов часто показывают наилучшие технологические характеристики при значениях рабочего давления, отличающихся от паспортных.

5. Мембрана должна быть химически стойкой по отношению к разделяемым растворам и иметь невысокую стоимость.

В рамках данной работы были изучены основные кинетические характеристики процесса мембранного концентрирования и деминерализации подсырной сыворотки на наиболее подходящих, по данным литературного обзора, ультрафильтрационных мембранах – УАМ-150, УПМ-100 и УПМ-К (см. Главу 3). В результате исследований для промышленной реализации процесса была выбрана мембрана УПМ-100.

Для расчета рабочей площади и секционирования ультрафильтрационного аппарата плоскокамерного типа используем уравнение о взаимосвязи коэффициента задержания и удельного потока растворителя, которое имеет следующий вид:

$$J = J_0 \cdot (1 - K_{зад}^{(-1/K_k)}), \quad (5.1)$$

где J_0 - константа проницаемости по воде; K_k – коэффициент концентрирования:

$$K_k = \frac{C_{pem}}{C_{ucx}} \quad (5.2)$$

Определяем рабочую площадь мембраны в рассчитываемом аппарате

$$F_m = \frac{V_{nep}}{J} \quad (5.3)$$

Рабочая площадь одного элемента равна:

$$F_{\circ} = 2 \cdot F_M ; \quad (5.4)$$

Общее число элементов в аппарате можно вычислить по следующей формуле:

$$n = \frac{F_M}{F_{\circ}} \quad (5.5)$$

Количество тепла, образующееся от прохождения электрического импульса через аппарат, определяется по закону Джоуля-Ленца, исходя из общего времени проведения процесса τ , величины приложенного к системе тока I и значения сопротивления аппарата R :

$$Q_{эл} = I^2 R \tau \quad (5.6)$$

Величина сопротивления, приняв, что сопротивления последовательно соединенных камер аппарата равны R_k , рассчитывается исходя из сопротивлений отдельных элементов:

$$R = nR_k$$

$$R_k = R_{nэ}^{\Lambda} + R_{nn}^{\Lambda} + R_M^{\Lambda} + R_p + R_M^n + R_{nn}^n + R_{nэ}^n, \quad (5.7)$$

где $R_{nэ}$, R_{nn} , R_M , R_p – соответственно сопротивления электрода, подложки, мембраны и раствора.

Геометрические характеристики поперечного сечения электрода варьируют, пока не будет достигнута необходимая величина $R_{nэ}$.

Уравнение (5.7) записанное через электропроводности всех элементов примет вид:

$$R_k = \left(\frac{2\delta_{nэ}}{\chi_{nэ}} + \frac{2\delta_{nn}}{\chi_{nn}} + \frac{2\delta}{\chi_M} + \frac{X}{\chi_p} \right) \frac{1}{F_M} \quad (5.8)$$

Мощность нагрева можно определить по общему теплу и времени протекания процесса [134]:

$$P = 0,00028 \cdot k \cdot Q / \tau, \quad (5.9)$$

где P – мощность нагрева, Вт, τ – время реализации процесса, $0,00028k$ – эмпирический коэффициент, который учитывает КПД теплопередачи и потери тепла.

Уравнение, связывающее мощность нагрева P от массового расхода раствора m/τ , удельную теплоемкость c раствора и величину перепада температуры ΔT , позволяет определить разницу между исходной температурой раствора и температурой раствора в момент времени τ :

$$\Delta T = \frac{P \cdot \tau}{m \cdot c} \quad (5.10)$$

Затем производят определение энергозатрат на процесс ультрафильтрационного концентрирования

$$W = 26,8(C_{кон} - C_{исх}) \cdot J + \frac{V_{пер} \cdot \Delta P}{\eta K}. \quad (5.11)$$

На основе предложенной методики расчета разработана и зарегистрирована программа для ЭВМ № 2013618596 [4].

5.3 Разработка технологической схемы ультрафильтрационного концентрирования и деминерализации подсырной сыворотки для ООО «Бондарский сыродельный завод»

По результатам расчета установки для ультрафильтрационного концентрирования и деминерализации подсырной сыворотки с импульсным подводом тока, исходя из объемов ее образования в технологическом цикле Бондарского сыродельного завода, для концентрирования подсырной сыворотки в непрерывном цикле на Бондарском сыродельном заводе можно применять четыре параллельные ультрафильтрационные установки, содержащие мембранные аппараты с рассчитанными характеристиками (см. Приложение Г) [109]. Схема такой линии представлена на рис. 5.2.

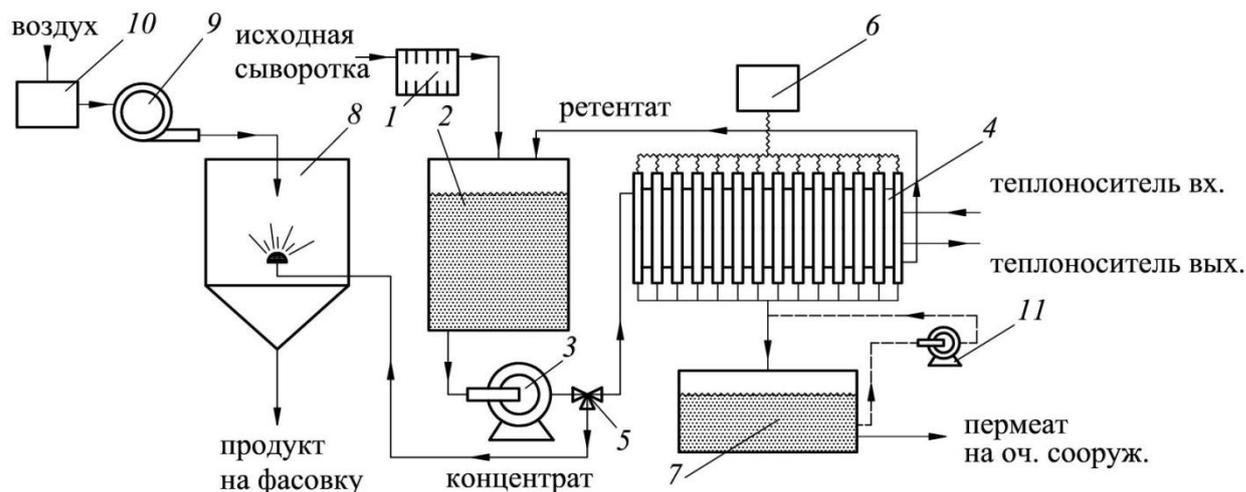


Рис. 5.2. Технологическая схема линии ультрафильтрационного концентрирования и деминерализации подсырной сыворотки для ООО «Бондарский сыродельный завод».

1 – центрифуга; 2 – исходная емкость; 3 – рабочий насос; 4 – ультрафильтрационный аппарат; 5 – трехходовой вентиль; 6 – источник электрических импульсов; 7 – емкость пермеата; 8 – распылительная сушилка; 9 – тепловентилятор; 10 – патронный фильтр; 11 – промывной насос

Для предотвращения быстрой закупорки пор мембран, при поступлении подсырной сыворотки из сыроизготовителей в расходную емкость 2 мембранной линии необходимо предварительное отделение жировых и казеиновых частиц [131, 132] в центрифуге 1. Насос 3, в зависимости от выбранного режима и положения трехходового вентиля 5, осуществляет подачу сыворотки в мембранный аппарат 4 или, после достижения необходимой степени концентрирования, - подачу концентрата на распылительную сушилку 8. Подача электрических импульсов на электроды ультрафильтрационного аппарата осуществляется источником электрических импульсов 6. На линии пермеата, между емкостью для сбора пермеата 7 и ультрафильтрационным аппаратом 4, предусмотрен промывной насос 11 для промывки мембранной системы обратным током. Воздух для распылительной сушилки 8 забирается из атмосферы через патронный фильтр 10, не допускающий попадания пыли в пищевое сырье. Воздух

нагоняется и нагревается тепловентилятором 9, мощность которого подбирается при расчете сушилки.

Распылительная сушилка подбирается из типовых модификаций, исходя из необходимой производительности. Расчет типовой стадии сушки не представляет интерес и не приводится в рамках данной работы [135].

Приведенная технологическая схема принята к внедрению на ООО «Бондарский сыродельный завод». Ожидаемый экономический эффект от внедрения – 500 тыс. руб. в год в ценах 2015 года [136].

Исходная сыворотка поступает в исходную емкость из трех сыроизготовителей, проходя 30 секундную стадию центрифугирования. Процесс производства сыра в сыроизготовителях на ООО «Бондарский сыродельный завод» занимает 1,5 часа. За это время сыворотка концентрируется предложенными ультрафильтрационными аппаратами до содержания белков 40 % масс. По истечению этого времени и по достижении заданной концентрации насос переключается для подачи концентрата на сушилку. Параллельно идет заполнение второй (параллельной) исходной емкости новой порцией сыворотки, концентрирование которой начинается по окончании сушки концентрата. Опыт работы ООО «Бондарский сыродельный завод» показал, что линия сыроизготовителей редко эксплуатируется в режиме максимальной производительности, поэтому возможно использование только одной исходной емкости.

5.4 Расчет экономической эффективности ультрафильтрационного концентрирования и деминерализации подсырной сыворотки на ООО «Бондарский сыродельный завод»

Процесс производства сыра на ООО «Бондарский сыродельный завод» организован по следующей схеме – сырная масса свертывается из молока под действием сычужных ферментов. Вторичным продуктом при этом является молочная, или подсырная, сыворотка. Таким образом, подсырная сыворотка

– это жидкая масса, остающаяся после извлечения белковых компонентов молока, свернувшихся под действием сычужных ферментов. Масса сыра составляет $\omega_{\text{сыр}} = 10 - 20 \%$ массы исходного молока, а оставшиеся $\omega_{\text{сыв}} = 80 - 90 \%$ массы - молочная сыворотка.

Рассмотрим возможность применения мембранных технологий в технологическом цикле ООО «Бондарский сыродельный завод».

Начинается производство сыра здесь с наполнения трех сыроизготовителей. Объемом каждого из них $V_i = 5000$ л. Задействованное для наполнения сыроизготовителей насосное оборудование имеет производительность $G_{\text{нап}} = 10$ м³/ч и его энергопотребление составляет $W_{\text{нас}} = 18$ кВт*ч. Время, затрачиваемое на наполнение всех сыроизготовителей составляет $\tau_{\text{нап}} = 1,5$ ч времени. А затраты энергии:

$$N_{\text{нап}} = W_{\text{нас}} \cdot \tau_{\text{нап}} = 27 \text{ кВт.} \quad (5.12)$$

После добавления к молоку незначительного количества сычужных ферментов начинается перемешивание. Время перемешивания по технологии завода составляет $\tau_{\text{перем}} = 1,5$ часа. В результате из молока выделяется твердая масса свернувшихся веществ, которая рубится в сырную крошку. В рамках данной работы мы пренебрегаем затратами энергии на перемешивание и дробление получаемой сырной массы.

Из опыта работы завода, выход сыворотки составляет около $\omega_{\text{сыв}} = 80 \%$ от массы загруженного молока. Поэтому, после остановки сыроизготовителей, в них находится сыворотки

$$V_{\text{сыв}} = i \cdot V_i \cdot \frac{\omega_{\text{сыв}}}{100\%} = 12 \text{ м}^3. \quad (5.13)$$

Технология предусматривает переход $\omega_{\text{б.сыр}} = 80 \%$ молочных белков в сыр, а оставшиеся $\omega_{\text{б.сыв}} = 20 \%$ переходят в молочную сыворотку.

Если принять среднее содержание белка в молоке равным $\omega_{\text{мол}}^{\text{бел}} = 3,2 \%$ по массе, то масса белков, содержится в исходном объеме молока составит $m_{\text{бел}} = 480$ кг при исходном объеме:

$$V_{\text{мол}} = i \cdot V_i = 15 \text{ 000 л.} \quad (5.14)$$

Из этой массы в сыр переходит $m_{\text{бел.сыр}} = 384$ кг, а остается в сыворотке – $m_{\text{бел.сыв}}^{12000} = 96$ кг.

Можно подсчитать энергозатраты на производство одного кг белка в виде конечного продукта (сыра):

$$N_{\text{сыр}}^{\text{бел}} = N_{\text{нап}} / m_{\text{бел.сыр}} = 27 \text{ кВт} / 384 \text{ кг} = 0,07 \text{ кВт/кг}. \quad (5.15)$$

Как уже упоминалось, в сыворотку, объем которой составил $V_{\text{сыв}} = 12\,000$ л, перешло $m_{\text{бел.сыв}}^{12000} = 96$ кг белка.

Процесс концентрирования этого белка будем рассматривать применительно к мембранному ультрафильтрационному аппарату собственной разработки. Основные отличия аппарата от классических ультрафильтрационных решений [138] - наличие в камере разделения электродов, позволяющих производить импульсную подачу электрического тока, с целью деминерализации сыворотки, а также наличие системы охлаждения сыворотки, которая позволяет отводить излишки тепла в процессе концентрирования, что предотвращает порчу сыворотки за счет нагревания в аппарате.

Исходя из требуемой производительности мембранной установки в промышленном исполнении $G_{\text{мем}} = 16\,000$ л/ч, потребляемая мощность составит $W_{\text{мем}} = 15$ кВт·ч. Получаем затраты энергии на концентрирование $V_{\text{сыв}}^{\text{вх.мем}} = 16\,000$ л сыворотки – они составят $N_{\text{мем}} = 15$ кВт. Исходя из средней эффективности разделения $\eta_{\text{мем}} = 85\%$ и того, что по вышеприведенным расчетам в $V_{\text{сыв}} = 12\,000$ л сыворотки содержится $m_{\text{бел.сыв}}^{12000} = 96$ кг белка, рассчитаем массу белка в $V_{\text{сыв}}^{\text{вх.мем}} = 16\,000$ л сыворотки – $m_{\text{бел.сыв}}^{16000} = 128$ кг и определим массу белка в мембранном концентрате:

$$m_{\text{бел}}^{\text{изв}} = \frac{\eta_{\text{мем}}}{100\%} \cdot m_{\text{бел.сыв}}^{16000} = 109 \text{ кг}. \quad (5.16)$$

По экспериментальным наблюдениям, объем концентрата составит 15% от исходного объема сыворотки:

$$V_{\text{кон}} = \left(1 - \frac{\eta_{\text{мем}}}{100\%}\right) \cdot V_{\text{сыв}}^{\text{вх.мем}} = 2400 \text{ л}. \quad (5.17)$$

По полученным затратам энергии на процесс концентрирования, вычислим затраты энергии на получение 1 кг концентрированного белка в мембранном аппарате:

$$N_{\text{СЫВ}}^{\text{к.бел}} = \frac{W_{\text{мем}}}{m_{\text{бел}}^{\text{извл}}} = 0,14 \text{ кВт/кг.} \quad (5.18)$$

Технология получения товарного продукта предусматривает сушку концентрата. После сушки продукт представляет собой сухой белый порошок со средним содержанием белка 80%, жира 7%, влаги – 3,6%, золы – 2%. А достигаемый за счет электрических импульсов уровень деминерализации, равный 80 %, позволяет реализовывать такой продукт на рынке под маркой КСБ-80. Сокращенное наименование означает «концентрат сывороточный белковый» с содержанием белка не менее 80%. Такой концентрат находит широкое применение в пищевой промышленности, при производстве напитков специального назначения, молочных продуктов с повышенным содержанием белка, безалкогольных напитков, детского питания и др. продуктов.

Следует отметить, что потребности России в сухом сывороточном концентрате не удовлетворяются за счет собственных производств. Имеет место импорт сывороточных концентратов [107].

Рассмотрим процесс сушки сывороточного концентрата. Существуют различные типы сушильных агрегатов для реализации этого процесса [135]. Рассмотрим один из типовых вариантов – стандартную распылительную сушилку производительностью $G_{\text{суш}} = 600$ л/ч.

Сушка – один из наиболее энергозатратных этапов производства сухого концентрата – энергопотребление сушилки выбранного типа достигает значения $N_{\text{КСБ}}^{\text{суш.бел}} = 44$ кВт/кг на 1 кг сухого продукта.

Суммируя энергозатраты на всех этапах производства КСБ-80 получаем значение затрат энергии на производство 1 кг конечного товарного продукта:

$$N_{\text{КСБ}}^{\text{бел}} = N_{\text{КСБ}}^{\text{суш.бел}} + N_{\text{СЫВ}}^{\text{к.бел}} = 44,14 \text{ кВт/кг.} \quad (5.19)$$

С энергетической точки зрения процесс производства сыра значительно выгоднее процесса концентрирования сыворотки в продукт КСБ-80. В случае производства сыра затраты энергии в пересчете на чистый белок составляют $N_{\text{сыр}}^{\text{бел}} = 0,07$ кВт/кг, против $N_{\text{КСБ}}^{\text{бел}} = 44,14$ кВт/кг в случае производства КСБ-80. Это объясняет низкий интерес промышленности в России к переработке сыворотки [112, 113, 137].

Для анализа экономической эффективности вопроса переработки сыворотки, рассмотрим получаемые продукты с учетом сложившихся в нашей стране цен на них. Приведенное выше значение энергозатрат на производство сыра, равное $N_{\text{сыр}}^{\text{бел}} = 0,07$ кВт/кг, дано в пересчете на чистый белок. Учитывая среднее содержание белка в сыре – $\omega_{\text{сыр}}^{\text{бел}} = 20\%$ - перейдем к массе конечного продукта (сыра).

По приведенным выше расчетам, на производство массы сыра, в которую переходит $m_{\text{бел.сыр}} = 384$ кг молочных белков, затрачивается в среднем $N_{\text{нап}} = 27$ кВт энергии. В пересчете на сыр это означает, что на производство сыра массой

$$m_{\text{сыр}}^{384} = \frac{100\%}{\omega_{\text{сыр}}^{\text{бел}}} \cdot m_{\text{бел.сыр}} = 2 \text{ т} \quad (5.20)$$

затрачивается $N_{\text{нап}} = 27$ кВт энергии. В пересчете на 1 кг сыра - $N_{\text{сыр}}^{1\text{кг}} = 0,01344$ кВт энергии. При средней стоимости сыра на Российском рынке $c_{\text{сыр}} = 300$ руб/кг, на производство 1 руб товарной продукции в виде сыра затрачивается энергии:

$$N_{\text{сыр}}^{1\text{руб}} = \frac{N_{\text{сыр}}^{1\text{кг}}}{c_{\text{сыр}}} = 0,0000448 \text{ кВт}. \quad (5.21)$$

Возвращаясь к полученному ранее значению энергозатрат $N_{\text{КСБ}}^{\text{бел}} = 44,14$ кВт на 1 кг КСБ-80, учитывая стоимость этого продукта $c_{\text{КСБ}} = 600$ руб/кг, получаем, что на производство 1 руб товарной продукции в виде КСБ-80 затрачивается энергии:

$$N_{\text{КСБ}}^{1\text{руб}} = \frac{N_{\text{КСБ}}^{\text{бел}}}{c_{\text{КСБ}}} = 0,07356666 \text{ кВт}. \quad (5.22)$$

Средняя стоимость 1 кВт энергии в России составляет $c_{эн} = 4$ руб/кВт. Таким образом затраты на производство 1 руб товарной продукции в виде сыра составляют:

$$T_{сыр}^{1руб} = N_{сыр}^{1руб} \cdot c_{эн} = 0,0000448 \text{ кВт} \cdot 4 \text{ руб/кВт} = 0,0001792 \text{ руб.} \quad (5.23)$$

А затраты на производство 1 руб товарной продукции в виде КСБ-80 составляют:

$$T_{КСБ}^{1руб} = N_{КСБ}^{1руб} \cdot c_{эн} = 0,07356666 \text{ кВт} \cdot 4 \text{ руб/кВт} = 0,29426664 \text{ руб.} \quad (5.24)$$

Как видно из этих расчетов, производство концентрата КСБ-80 – процесс гораздо более затратный, по сравнению с производством сыра. Однако, значение затрат $T_{КСБ}^{1руб} = 0,29426664$ руб на 1 руб продукта показывает, что данное производство является экономически выгодным и позволяет получать порядка 70 копеек прибыли с каждого 1 рубля конечного продукта. Кроме того, очень важен тот факт, что молочная сыворотка является побочным продуктом производства сыра. А это означает следующее. При вложении средств в концентрирование сыворотки, суммы вложений будут значительно выше, по сравнению с производством сыра, однако, эти вложения будут возвращены после продажи продукта. А при отказе от вложений и сбросе полученной сыворотки на очистные сооружения, придется оплатить услуги очистки таких стоков, а кроме того и предусмотренные законодательством РФ платежи за негативное воздействие на окружающую среду. И эти средства уже не будут возвращены, а станут дополнительными издержками при производстве сыра.

5.5 Выводы по пятой главе

1. Предложен численный метод реализации инженерного расчета рабочей площади мембран и количества мембранных элементов для ультрафильтрационного процесса концентрирования и деминерализации подсырной сыворотки с учетом электрического импульса. Разработанная методика позволяет определить температуру нагрева концентрируемого сырья за счет наложения электрических импульсов в любой момент времени, исходя из основных технологических характеристик процесса. Инженерная методика позволяет также рассчитывать энергозатраты на процесс ультрафильтрационного концентрирования и деминерализации подсырной сыворотки.

2. Разработана и запатентована (патент № 2532813 RU) высокоэффективная конструкция ультрафильтрационного аппарата плоскокамерного типа для концентрирования и деминерализации подсырной сыворотки с импульсным подводом тока. Данный аппарат позволяет одновременно осуществлять три технологические операции (концентрирование, деминерализацию и процесс охлаждения или нагрева сыворотки), что интенсифицирует процесс концентрирования и снижает себестоимость по сравнению с аналогичными плоскокамерными аппаратами. Аппарат принят к применению ОАО «ТАГАТ» им. С.И. Лившица г. Тамбов. Разработаны программы и проведены вычислительные эксперименты по расчету оптимальных технологических и конструктивных параметров ультрафильтрационного аппарата плоскокамерного типа (свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2013618596, №2014615341, №2015614888) [4 - 6].

3. Усовершенствована технологическая схема линии концентрирования и деминерализации подсырной сыворотки с импульсным подводом тока для ООО «Бондарский сыродельный завод» с получением сухого сывороточного

концентрата, включающая ультрафильтрационный аппарат плоскокамерного типа. Схема принята к внедрению на ООО «Бондарский сыродельный завод».

4. Обоснована экономическая эффективность предложенной линии ультрафильтрационного концентрирования и деминерализации подсырной сыворотки для ООО «Бондарский сыродельный завод». Ожидаемый экономический эффект от внедрения линии составит 500 тыс. руб. в год в ценах 2015 года. Расчетная себестоимость производства концентрата составляет 0,29 руб. на 1 руб. товарного продукта.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Изучены кинетические и технологические закономерности ультрафильтрационного концентрирования и деминерализации подсырной сыворотки, в том числе с импульсным подводом тока. Получены экспериментальные данные по коэффициенту задержания, удельному потоку растворителя, диффузионному потоку и коэффициенту распределения в зависимости от концентрации, температуры и величины импульса тока. Обобщены и проанализированы результаты экспериментальных исследований и получены численные значения эмпирических коэффициентов, позволяющие теоретически рассчитывать и в дальнейшем прогнозировать качество и производительность процесса ультрафильтрационного концентрирования и деминерализации подсырной сыворотки с импульсным подводом тока.

2. Разработана математическая модель процесса ультрафильтрационного концентрирования и деминерализации подсырной сыворотки с учетом влияния электрического импульса. Модель основана на полученном выражении для расчета осмотического потока растворителя и балансных соотношениях и позволяет рассчитывать значения концентраций и объемы пермеата и ретентата в промежуточных камерах и на выходе из плоскокамерного ультрафильтрационного аппарата с импульсным подводом тока. Проверена адекватность математической модели путем сравнения экспериментальных и расчетных зависимостей коэффициента задержания от концентрации белка при ультрафильтрационном концентрировании подсырной сыворотки с импульсным подводом тока. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2015614888.

3. Разработан численный метод реализации инженерного расчета рабочей площади мембран и количества мембранных элементов для ультрафильтрационного процесса концентрирования и деминерализации подсырной сыворотки с учетом электрического импульса. Разработанный алгоритм позволяет определять температуру нагрева концентрируемого

сырья за счет наложения электрических импульсов в любой момент времени, исходя из основных технологических характеристик процесса. Алгоритм позволяет также рассчитывать энергозатраты на процесс ультрафильтрационного концентрирования и деминерализации подсырной сыворотки с импульсным подводом тока. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2013618596.

4. Предложен численный метод реализации расчета периода функционирования ультрафильтрационных мембран с учетом набухания, позволяющий определять период времени эффективной реализации процесса концентрирования и деминерализации подсырной сыворотки до замены мембран. По разработанному алгоритму расчетное время эффективной работы мембраны УАМ-150 при различных условиях процесса концентрирования и деминерализации составляет 82-125 часов. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2014615341.

5. Разработана и запатентована (патент № 2532813 RU) высокоэффективная конструкция ультрафильтрационного аппарата плоскокамерного типа для концентрирования и деминерализации подсырной сыворотки с импульсным подводом тока. Данный аппарат позволяет одновременно осуществлять три технологические операции (концентрирование, деминерализацию и процесс охлаждения или нагрева сыворотки), что интенсифицирует процесс концентрирования и снижает себестоимость по сравнению с аналогичными плоскокамерными аппаратами. Аппарат принят к применению ОАО «ТАГАТ» им. С.И. Лившица г. Тамбов.

6. Экспериментально определены и обоснованы рациональные условия реализации процесса ультрафильтрационного концентрирования и деминерализации подсырной сыворотки с импульсным подводом тока: с применением ультрафильтрационных мембран УПМ-100 при давлении 1 МПа, с наложением электрических импульсов периодом 1 с, плотностью тока 75 А/м^2 и отводом тепла, обеспечивающим поддержание температуры ретентата на уровне 293 К.

7. Предложена усовершенствованная технологическая схема линии концентрирования и деминерализации подсырной сыворотки для ООО «Бондарский сыродельный завод» с получением сухого сывороточного концентрата, включающая ультрафильтрационный аппарат плоскокамерного типа. Обоснована ее экономическая эффективность. Схема принята к внедрению на ООО «Бондарский сыродельный завод». Ожидаемый экономический эффект составит 500 тыс. руб. в год в ценах 2015 г. Расчетная себестоимость производства концентрата составляет 0,29 руб. на 1 руб. товарного продукта.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Храмцов, А.Г. Рациональное использование обезжиренного молока, пахты и молочной сыворотки: научно-технические рекомендации [Текст] / А.Г. Храмоцов, С.В. Василисин. – Ставрополь, 2001.
2. Храмцов, А.Г. Феномен молочной сыворотки [Текст] / А.Г. Храмцов. – Спб.: Профессия, 2011. – 804 с.
3. Пат. №2532813 РФ, МПК В01 D61/42, В01 D63/08. Электробаромембранный аппарат с плоскими фильтрующими элементами [Текст] / Лазарев С.И., Ковалев С.В., Вязовов С.А., Богомолов В.Ю.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО ТГТУ. - № 2013121636/05; заявл. 07.05.2013; опубл. 10.11.2014, Бюл. № 31.
4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013618596. Расчет влияния температуры на кинетические параметры электробаромембранного процесса / В.Ю. Богомолов, С.И. Лазарев, С.А. Вязовов. – 12.09.2013.
5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014615341. Расчет технологических характеристик ультрафильтрационного концентрирования подсырной сыворотки / В.Ю. Богомолов, С.И. Лазарев, В.И. Кочетов, С.А. Вязовов. – 26.05.2014.
6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015614888. Расчет кинетических коэффициентов электробаромембранного извлечения органических веществ из промышленных стоков / С.И. Лазарев, В.Ю. Богомолов, В.Г. Казаков. – 29.04.2015.
7. Богомолов, В.Ю. Энергоэффективная мембранная переработка подсырной сыворотки [Текст] / В.Ю. Богомолов, С.И. Лазарев, С.А. Вязовов // Актуальные проблемы энергосбережения и энергоэффективности в технических системах: сборник докладов 2-й меж-дунар. конф. с элем. научн. школы. - Тамбов, 2015. – С. 57 - 59.

8. Лазарев, С.И. Мембранный метод концентрирования отходов на Бондарском сыродельном заводе [Текст] / С.И. Лазарев, В.Ю. Богомолов, К.К. Полянский // Сыроделие и маслоделие. – 2014. – № 4. – С. 34 - 36.
9. Ключников, А.И. Пилотные установки мембранной фильтрации в процессах переработки молочного сырья [Текст] / А.И. Ключников, А.Н. Пономарев, К.К. Полянский // Сыроделие и маслоделие. – 2014. – № 4. – С. 32 - 33.
10. Агаджанян, А.Е. Комплексная переработка молочной сыворотки [Текст] / А.Е. Агаджанян, А.О. Цатурян, Г.Ж. Оганесян, К.И. Егян, А.С. Сагиян // Химический журнал Армении. – 2011. - №64. – С. 417 – 426.
11. Гунькова, П.И. Биотехнологические свойства белков молока [Текст] / П.И. Гунькова, К.К. Горбатова. - СПб.: Гиорд, 2015. - 216 с.
12. Горбатова, К.К. Биохимия молока и молочных продуктов: Учебник для СПО. 4-е изд., пер. и доп. [Текст] / К.К. Горбатова. - СПб.: Гиорд, 2015. – 336 с.
13. Банникова, А.В. Инновационный подход к созданию обогащенных молочных продуктов с повышенным содержанием белка [Текст] / А.В. Банникова, И.А. Евдокимов. - М.: ДеЛи плюс, 2015. – 136 с.
14. Зобкова, З.С. Обогащение молока и кисломолочных напитков витаминами [Текст] / З.С. Зобкова, Л.Н. Шатнюк, В.Б. Спиричев. – М.: ГУП ВНИИ молочной промышленности. ГУ НИИ питания РАМН, 2002. – 32 с.
15. Лоу, К. Все о витаминах [Текст] / К. Лоу. Пер. с англ. Е. Незлобиной. – М.: Крон-пресс, 2000. – 352 с.
16. Храмцов, А.Г. Молочная сыворотка [Текст] / А.Г. Храмцов. – М.: Агропромиздат, 1990. – 240 с.
17. Храмцов, А.Г. Технология продуктов из молочной сыворотки [Текст] / А.Г. Храмцов, П.Г. Нестеренко. - М.: ДеЛи принт, 2004. – 587 с.
18. Дьяченко, П. Ф. Технология молока и молочных продуктов: учебник для студентов вузов [Текст] / П.Ф. Дьяченко, М.С. Коваленко, А.Д. Грищенко, А.И. Чеботарев – М.: Пищевая промышленность, 1974. - 447 с.

19. Вышемирский, Ф.А. Производство масла из коровьего молока в России [Текст] / Ф.А. Вышемирский. – Спб.: ГИОРД, 2010. – 288 с
20. Вышемирский, Ф.А. Маслоделие в России: история, состояние перспективы [Текст] / Ф.А. Вышемирский. – Углич, 1998. – 589 с.
21. Сенкевич, Т. Молочная сыворотка: переработка и использование в агропромышленном комплексе [Текст] / Т. Сенкевич, К. Ридель. – М.: Агропромиздат, 1989. – 270 с.
22. Семенов, А.Г. Мембранные методы в технологии продуктов на основе молока и молочной сыворотки [Текст] / А.Г. Семенов, Б.А. Лобасенко. – Кемерово: Кемеровский технологический институт пищевой промышленности, 2014. – 147 с.
23. Гаврилов, Г.Б. Мембранные процессы для переработки молока и сыворотки [Текст] / Г.Б. Гаврилов, Э.Ф. Кравченко, В.Г. Гаврилов // Сыроделие и маслоделие. - 2013. - № 6. - С. 22-23.
24. Separation processes in the food and biotechnology industries: principles and applications / A.S. Grandison, M.J.Lewis (ed.). – Cambridge: Woodhead Publishing, 2006. –295 pp.
25. Храпцов, А.Г. Промышленная переработка нежирного молочного сырья [Текст] / А.Г. Храпцов, К.К. Полянский, П.Г. Нестеренко, С.В. Васи́лин. – Воронеж: Изд-во Воронежского университета, 1992. – 192 с.
26. Scott, R. Cheesemaking practice / R.Scott, R. K. Robinson, R.A. Wilbey. – New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers, 1998. – 449 pp.
27. Храпцов, А.Г. Безотходная технология в молочной промышленности [Текст] / А.Г. Храпцов, П.Г. Нестеренко. – М.: Агропромиздат, 1989. – 279 с.
28. Гаврилов, Г.Б. Производство ЗЦМ с применением наночистоты [Текст] / Г.Б. Гаврилов, С.А. Куренков // Сыроделие и маслоделие. - 2013. - № 3. - С. 39.
29. Голубева, Л.В. Технология молочных консервов и заменителей цельного молока [Текст] / Л.В. Голубева. - М.: ДеЛи принт, 2005. – 376 с.

30. Гаврилов, Г.Б. Справочник по переработке молочной сыворотки. Технологии, процессы и аппараты, мембранное оборудование [Текст] / Г.Б. Гаврилов, А.Ю. Просеков, Э.Ф. Кравченко, Б.Г. Гаврилов. - СПб.: Профессия, 2015. – 176 с.
31. Мерзликина, А.А. Применение ультрафильтрации в производстве творожных продуктов [Текст] / А.А. Мерзликина, К.К. Полянский, А.Н. Пономарев, А.И. Ключников // Сыроделие и маслоделие. – 2014. – № 6. – С. 44 - 45.
32. Ключников, А.И. Мембранные системы и инжиниринг при переработке молочного сырья [Текст] / А.И. Ключников, А.Н. Пономарев, К.К. Полянский // Молочная промышленность. – 2012. – № 4. – С. 71 - 72.
33. Богомолов, В.Ю. Мембранная переработка подсырной сыворотки [Текст] / В.Ю. Богомолов // Современные предпосылки развития инновационной экономики: Материалы 1-й Международ. науч.-практ. конф. - Тамбов, 2013. - С. 33-35.
34. Получение, свойства и применение молочно-белковых и растительных концентратов: Сборник научных трудов ВНИМИ. – М.: Агропромиздат, 1991. – 187 с.
35. Храмцов, А.Г. Полное и рациональное использование молочной сыворотки на принципах безотходной технологии: Учебное пособие. [Текст] / А.Г. Храмцов, А.И. Жаринов, С.М. Кунижев и др. – Ставрополь, 1997. – 120 с.
36. Дымар, О.В. Применение процесса электродиализа при переработке молочной сыворотки [Текст] / О.В. Дымар, М.В. Зублик, И.В. Миклук // Актуальные проблемы животноводства, ветеринарной медицины, переработки сельскохозяйственной продукции и товароведения. – Воронеж, 2010. – С. 290 – 291.
37. Богомолов, В.Ю. Промышленная переработка вторичного молочного сырья [Текст] / В.Ю. Богомолов, С.И. Лазарев // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. – 2014. – № 1 (50). – С. 82 – 91.

38. Гаврилов, Г.Б. Выбор мембранных методов обработки сыворотки: с чего начать [Текст] / Г.Б. Гаврилов // Молочная промышленность. - 2012. - № 2. - С. 38.
39. Полянский, К.К. Деминерализация молочной сыворотки электродиализом [Текст] / К.К. Полянский, В.А. Шапошник, А.Н. Пономарев // Молочная промышленность. - 2004. - №10. – С. 48 – 49.
40. Свитцов, А.А. Введение в мембранную технологию [Текст] / А.А. Свитцов. - М.: ДеЛи принт, 2007. - 208 с.
41. Богомолов, В.Ю. Баромембранная очистка сточных вод от продуктов сыроделия [Текст] / В.Ю. Богомолов, С.И. Лазарев, Ю.М. Головин, К.К. Полянский // Сыроделие и маслоделие. – 2013. – № 6. – С. 24 – 26.
42. Меркулова, Н.Г. Переработка молока: Практические рекомендации [Текст] / Н.Г. Меркулова, М.Ю. Меркулов, И.Ю. Меркулов. - СПб.: Профессия, 2013. – 336 с.
43. Семенов, А.Г. Математическое описание процесса ультрафильтрации с учетом гелеобразования на поверхности мембраны [Текст] / А.Г. Семенов, Б.А. Лобасенко // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2001. – № 8. – С. 15-17.
44. Семенов, А.Г. Численный анализ модели процесса гелеобразования при ультрафильтрации на плоской мембране [Текст] / А.Г. Семенов, Ю. Н. Захаров, Р.Б. Лобасенко // Технология и техника пищевых производств / Кемеровский технологический институт пищевой промышленности. – Кемерово, 2003. – С. 164-167.
45. Семенов, А.Г. Анализ совместного переноса электролита и растворителя в ионообменной мембране [Текст] / А.Г. Семенов, А.Е. Пастушенко // Техника и технология пищевых производств / Кемеровский технологический институт пищевой промышленности. – Кемерово, 2005. – С. 188-191.
46. Гаврилов, Г.Б. Биомембранные процессы [Текст] / Г.Б. Гаврилов, Э.Ф. Кравченко, В.Г. Гаврилов // Молочная промышленность. - 2012. - № 7. С. 49-51.

47. Заболоцкий, В.И. Перенос ионов в мембранах [Текст] / В.И. Заболоцкий, В.В. Никоненко. – М.: Наука, 1996. – 392 с.
48. Заболоцкий, В.И. Математическая модель сверхпредельного состояния ионообменной мембранной системы [Текст] / В.И. Заболоцкий, К.А. Лебедев, Е.Г. Ловцов // Электрохимия. – 2006. – Т.42. – № 8. – С.931-941.
49. Shaposhnik, V.A. An early history of electrodialysis with permselective membranes / V.A. Shaposhnik, K. Kesore // J. Membrane Sci. – 1997. – V. 136 – P. 35 – 39.
50. Shaposhnik, V.A. Concentration fields of solutions under electrodialysis [Текст] / V.A. Shaposhnik, V.I. Vasil'eva, D.B. Praslov // J. Membrane Sci. – 1995. – V. 101. – P. 23- 30.
51. Шапошник, В.А. Концентрационное поле при электродиализе в ламинарном гидродинамическом режиме [Текст] / В.А. Шапошник // Электрохимия. – 1981. – Т. 17, № 11. – С. 1602-1606.
52. Дубяга, В.П. Полимерные мембраны [Текст] / В.П. Дубяга, Л.П. Перепечкин, Е.Е. Каталевский. - М.: Химия, 1981. - 232 с.
53. Дытнерский, Ю.И. Обратный осмос и ультрафильтрация [Текст] / Ю.И. Дытнерский. - М.: Химия, 1978. - 352 с.
54. Боронина, Л.В. Теоретические вопросы обратного осмоса и адсорбции при очистке многокомпонентных растворов [Текст] / Л.В. Боронина // Вестник СГАСУ. Градостроительство и архитектура. – 2013. - № 2 (10). – С. 54 – 59.
55. Study of fouling mechanism in pineapple juice clarification by ultrafiltration / S.T.D. de Barros, C.M.G. Andrade, E.S. Mendes, L. Peres // Journal of Membrane Science. – 2003. – V. 215. – P. 213–224.
56. Tone, S. Separation of aromatic substances from aqueous solutions using a reverse osmosis technique with thin, dense cellulose acetate membranes/ K. Shinohara, Y. Igorashi, T. Otake // Journal of membrane science. - 1984. - V. 19. - P. 195 - 208.

57. Song, L. Theory of Concentration Polarization in Crossflow Filtration / L. Song, M. Elimelech // Journal of the Chemical Society. Faraday Transactions. – 1995. – V. 91. – P. 3389-3398.
58. Scott, K. Handbook of industrial membranes / K. Scott. – Oxford: Elsevier Advanced Technology, 1995. – 912 pp.
59. Ключников, А.И. Анализ концентрационной поляризации в процессе микрофльтрации пива [Текст] / А.И. Ключников, А.Н. Пономарев, К.К. Полянский // Вестник тамбовского университета. Серия: естественные и технические науки. – 2012. – Вып.2. Т. 17. – С. 703 – 706.
60. Baker, R.W. Membrane technology and applications / R.W. Baker. - Chichester: Wiley, 2004.
61. Богомолов, В.Ю. Разработка мембранного аппарата комбинированного типа для очистки промышленных стоков [Текст] / В.Ю. Богомолов, В.И. Кочетов, С.И. Лазарев, А.Е. Стрельников // Техника и технологии – 2014: сборник статей Междунар. науч.-техн. конф. - Брянск, 2014. - С.66-68.
62. Zeman, L.J. Microfiltration and ultrafiltration: principles and applications / L.J. Zeman, A.L. Zydney. - New York: Marcel Dekker, 1996.
63. McGregor, W.C. Membrane separation in biotechnology / W.C. McGregor. - New York: Marcel Dekker, 1986.
64. Бабёнышев, С.П. Ультрафльтрация молочного сырья на аппаратах рулонного типа [Текст] / С.П. Бабёнышев, В.Е. Жидков, Д.С. Мамай, В.П. Уткин // Научный журнал КубГАУ. – 2010. - №78 (04). – С. 70 – 80.
65. Золоторева, М.С. Мембранные процессы в молочной промышленности – эффективно, современно, надежно [Текст] / М.С. Золоторева, Д.Н. Володин, М.В. Головкина, В.К. Топалов, В.М. Клепкер, И.А. Евдокимов, Г.С. Анисимов, В.А. Везирян // Сыроделие и маслоделие. – 2012. - №4. – С. 70 – 73.
66. Семенов А.Г. Термодинамический анализ и критерии подобия процессов переноса в ионообменной мембране [Текст] / А.Г. Семенов //

"Чистая вода-2009": труды Международной научно-практической конференции. – Кемерово, 20-21 октября 2009 г. – С. 319-323.

67. Семенов, А.Г. Гидродинамическое моделирование электродиализа [Текст] / А.Г. Семенов // "Ионный перенос в органических и неорганических мембранах": Материалы Международной конференции с элементами научной школы для молодежи. – Кемерово, 18-22 октября 2010 г. – С. 32-41.

68. Шапошник, В.А. Явления переноса в ионообменных мембранах [Текст] / В.А. Шапошник, В.И. Васильева, О.В. Григорчук // МФТИ, 2001. – 200 с.

69. Богомолов, В.Ю. Основные направления и проблемы использования отходов сырных производств [Текст] / В.Ю. Богомолов // Наука и образование для устойчивого развития экономики, природы и общества: Сборник докладов Междунар. науч.-практ. конф. – Тамбов, 2013. - Т.4. - С. 50-53.

70. Касаткин, А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии: учебник для ВУЗов 14-е изд. [Текст] / А.Г. Касаткин. – М.: ООО ИД «Альянс», 2008. – 753 с.

71. Кузина, Ж.И. Инструкция по санитарной обработке оборудования, инвентаря и тары на предприятиях молочной промышленности [Текст] / Ж.И.Кузина, Б.В. Маневич. – Торжок.: АО "Формат".– 1998. – 108 с.

72. Лисин, П.А. Современное технологическое оборудование для тепловой обработки молока и молочных продуктов: пастеризационные установки, подогреватели, охладители, заквасочники [Текст] / П.А. Лисин, К.К. Полянский и др. - СПб.: Гиорд, 2009. – 136 с.

73. Килкаст, Д. Стабильность и срок годности. Молочные продукты [Текст] / Д. Килкаст, П. Субраманиам. - СПб.: Профессия, 2012. – 320 с.

74. Методы и средства очистки воды и технологических растворов: Часть 1. - М.: Химия, 1993. - 97 с.

75. Зобкова, З.С. Пороки молока и молочных продуктов и меры их предупреждения [Текст] / З.С. Зобкова. – М.: Молочная промышленность, 1998. – 76 с.

76. Соколова, З.С. Технология сыра и продуктов переработки сыворотки. Учебное пособие [Текст] / Л.И. Лаконова, В.Г. Тиняков. – М.: Агропромиздат, 1992. – 335 с.
77. Залашко, М.В. Биотехнология переработки молочной сыворотки [Текст] / М.В. Залашко. – М.: Агропромиздат, 1990. – 122 с.
78. Нечаев, А.П. Пищевая химия: учебник для вузов [Текст] / А.П. Нечаев, С.Е. Траутенберг, А.А. Кочеткова и др. Под ред. А.П. Нечаева. – СПб.: ГИОРД, 2001. – 592 с.
79. Чекулаева, Л.В. Технология продуктов консервирования молока и молочного сырья: учебное пособие для вузов [Текст] / Л.В. Чекулаева, К.К. Полянский, Л.В. Голубева. – М.: ДеЛи принт, 2002. – 249 с.
80. Храмцов, А.Г. Российская лактулоза – XXI век. Научные основы, производство и использование [Текст] / А.Г. Храмцов, И.А. Евдокимов, С.А. Рябцева и др. – М.: МИИТ, 2000. – 110 с.
81. Гордезиани, В.С. Производство заменителей цельного молока [Текст] / В.С. Гордезиани. – М.: Агропромиздат, 1990. - 272 с.
82. Старов, В.М. Концентрирование и очистка растворов высокомолекулярных соединений [Текст] / В.М. Старов // Химия и технология воды. – 1987. – Т. 9. – № 3. – С. 195-199.
83. Кунижев, С.М. Новые технологии в производстве молочных продуктов [Текст] / С.М. Кунижев, В.А. Шуваев. - М.: ДеЛи принт, 2004. – 208 с.
84. Ключников, А.И. Высокоэффективная мембранная техника для нанофильтрации пищевых жидкостей [Текст] / А.И. Ключников, С.В. Востриков // Пищевая промышленность. – 2010. – № 9. – С. 40 – 41.
85. Шапошник, В.А. Математическая модель электродиализа с ионообменными мембранами и инертными турбулизаторами потока [Текст] / В.А. Шапошник, О.В. Григорчук // Электрохимия. – 2010. – Т. 46, №10. – С. 1264-1271.
86. Тимашев, С.Ф. Физико-химия мембран [Текст] / С.Ф. Тимашев. - М.: Химия, 1988. - 240 с.

87. Гаврилов, Г.Б. Пути рационального использования молочной сыворотки [Текст] / Г.Б. Гаврилов, Э.Ф. Кравченко // Сыроделие и маслоделие. - 2013. - № 2. - С. 10-13.
88. Blanch, H.W. Biochemical engineering / H.W. Blanch, D.S. Clark. - New York: Marcel Dekker, 1996.
89. Николаев, Н.И. Диффузия в мембранах [Текст] / Н.И. Николаев. – М.: Химия, 1980. – 232 с.
90. Мартынов, Г.А. К теории мембранного разделения растворов. Постановка задачи и решение уравнений переноса [Текст] / В.М. Старов, Н.В. Чураев // Коллоидный журнал. - 1980. - Т. 42. №3. - С. 489-499.
91. Новиков, Д.В. Топологическая структура микропористых ориентированных пленок полипропилена [Текст] / Д.В. Новиков, И.С. Курыдин, Г.К. Ельяшевич // Физика твердого тела. - 2015. – Т. 57. Вып. 5. - С. 1012 – 1016.
92. Гуцалюк, В.М. Вариационная постановка задачи массопереноса в процессах разделения через мембраны под давлением [Текст] / В.М. Гуцалюк // IV Всес. конф. по мембранным методам разделения смесей. - 1987. - Т. 4. - С. 13-15.
93. Tu, S.-C. A pore diffusion transport model for forecasting the performance of membrane processes / S.-C. Tu, V. Ravindran, M. Pirbazari // Journal of Membrane Science. – 2005. – V. 265. – P. 29–50.
94. Suki, A. Modeling fouling mechanisms in protein ultrafiltration / A. Suki, A.G. Fane, C.J.D. Fell // Journal of Membrane Science. – 1986. – V. 27. – P. 181-193.
95. Лялин, В.А. Классификация и математическое моделирование режимов ультрафильтрации [Текст] / В.А. Лялин, В.М. Старов, А.Н. Филиппов // Химия и технология воды. – 1990. – Т. 12. – № 5. – С. 387-393.
96. Чалых, А.Е. Диффузия в полимерных системах [Текст] / А.Е. Чалых. – М.: Химия, 1987. - 312 с.

97. Utilization of a shear induced diffusion model to predict permeate flux in the crossflow ultrafiltration of macromolecules / M.-C. Vincent Vela, S. Alvarez Blanco, J. Lora Garcia, J.M. Gonzalvez-Zafrilla, E. Bergantinos Rodriguez // *Desalination*. – 2007. – V. 206. – P. 61-68.
98. Yee, K.W.K. A unified model of the time dependence of flux decline for the long-term ultrafiltration of whey / K.W.K. Yee, D.E. Wiley, Jie Bao // *Journal of Membrane Science*. – 2009. – V. 332. – P. 69-80.
99. Семенов, А.Г. Математические модели ультрафильтрации [Текст] / А.Г. Семенов, Б.А. Лобасенко. – Кемерово: Кемеровский технологический институт пищевой промышленности, 2010. – 176 с.
100. Семенов А.Г. Математическая модель порционной установки для ультрафильтрационной сепарации молока [Текст] / А.Г. Семенов, Н.А. Благочевская, А. А. Сафонов // *Технология и техника пищевых производств / Кемеровский технологический институт пищевой промышленности*. – Кемерово, 2003. – С. 168-171.
101. Семенов, А.Г. Моделирование и расчет ультрафильтрационных установок периодического действия [Текст] / А.Г. Семенов, А.Е. Тимофеев // *Техника и технология пищевых производств*. – 2011. – № 1. – С. 84-89.
102. Дмитриева, Н.С. Исследования влияния электрического поля на процесс ультрафильтрации: дис. ... канд. техн. наук [Текст] / Н.С. Дмитриева. - М., 1983. - 120 с.
103. Богомолов, В.Ю. Повышение энергетической эффективности процесса мембранного концентрирования вторичного молочного сырья [Текст] / В.Ю. Богомолов, С.И. Лазарев, С.А. Вязовов // *Современные твердофазные технологии: теория, практика и инновационный менеджмент: материалы VI Междунар. науч.-инновацион. молодежн. конф.* - Тамбов, 2014. - С.268-270.
104. Koltuniewicz, A.B. The history and state of arts in membrane technologies // *VIII Spring Membrane School*, 2006.
105. Маннапперума, Д.Д. Разработка и оценка эффективности мембранных систем [Текст] / Д.Д. Маннапперума // *Пищевая инженерия: справочник с*

- примерами расчетов / К. Дж. Валентас, Э. Ротштейн, Р.П. Сингх (ред.). – СПб: Профессия, 2004. – Гл. 5. – С. 209-260.
106. Гаврилов, Г.Б. Проблема внедрения мембранных технологий не так сложна, как кажется [Текст] / Г.Б. Гаврилов // Молочная промышленность. – 2012. - №11. – С. 46-47.
107. Трухачев, В.И. Концентраты белков молока: выделение и применение [Текст] / В.И. Трухачев, В.В. Молочников, Т.А. Орлова. - Ставрополь: Агрус, 2009. – 152 с.
108. Илюхин, В.В. Монтаж, наладка, диагностика, ремонт и сервис оборудования предприятий молочной промышленности [Текст] / В.В. Илюхин, И.М. Тамбовцев, М.Я. Бурлев. - СПб.: Гиорд, 2008. – 504 с.
109. Голубева, Л.В. Проектирование предприятий молочной отрасли с основами промстроительства. - СПб.: Гиорд, 2010. – 288 с.
110. Костюков, Д.М. Закономерности концентрирования творожной сыворотки методом нанофильтрации [Текст] / Д.М. Костюков, В.Г. Куленко, Н.Я. Дыкало, Е.М. Костюков, В.А. Шохалов, В.Б. Шевчук // Молочнохозяйственный вестник. – 2012. - №1 (5). – С.32 – 36.
111. ГОСТ Р 53456-2009. Концентраты сывороточных белков. Технические условия. – Москва: Стандартинформ, 2010. – 9 с.
112. Лисин, П.А. Компьютерные технологии в рецептурных расчетах молочных продуктов [Текст] / П.А. Лисин. - М.: ДеЛи принт, 2007. – 102 с.
113. Фомина, О.Н. Молоко и молочные продукты: Энциклопедия международных стандартов [Текст] / О.Н. Фомина. - М.: Протектор, 2011. – 880 с.
114. Мембраны, фильтрующие элементы, мембранные технологии. Каталог. Владимир: ЗАО НТЦ «Владипор», 2007. - 22 с.
115. Крусь, Г.Н. Методы исследования молока и молочных продуктов [Текст] / Г.Н. Крусь, А.М. Шалыгина, З.В. Волокитина. Под общ. ред. А. М. Шалыгиной. – М.: Колос, 2000. – 368 с.
116. ГОСТ 25179-90. Молоко. Методы определения белка. – Москва: Стандартинформ, 1991. – 6 с.

117. Лазарев, С.И. Влияние физических свойств подсырной сыворотки на технологические процессы извлечения ее ценных компонентов [Текст] / С.И. Лазарев, В.Ю. Богомолов, О.В. Пронина, К.К. Полянский // Сыроделие и маслоделие. – 2015. – № 2. – С. 47-49.
118. Семенов, А.Г. Развитие гелевого загрязнения мембраны при тангенциальной ультрафильтрации раствора высокомолекулярного соединения [Текст] / А.Г. Семенов // Техника и технология пищевых производств. – 2011. – № 1. – С. 79-83.
119. Богомолов, В.Ю. Применение электрических импульсов в процессе мембранного концентрирования подсырной сыворотки [Текст] / В.Ю. Богомолов, С.И. Лазарев // Мембранні процеси та обладнання в харчових технологіях та інженерії: Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих учених і студентів. - Киев, 2014. - С.17.
120. Богомолов, В.Ю. Повышение эффективности мембранного концентрирования подсырной сыворотки [Текст] / В.Ю. Богомолов, С.И. Лазарев, В.И. Кочетов, В.П. Горбунов, А.В. Краснова // Вестник Тамбовского университета. Серия: естественные и технические науки. – 2014. – Т.19. Вып. 3. – С. 944 - 947.
121. Гаврилов, Г.Б. Закономерности мембранного концентрирования сывороточных белков [Текст] / Г.Б. Гаврилов // Техника и технология пищевых производств. – 2009. - №1. – С. 26 – 29.
122. Yee, K.W.K. Whey protein concentrate production by continuous ultrafiltration: Operability under constant operating conditions / K.W.K. Yee, D.E. Wiley, Jie Bao // Journal of Membrane Science. – 2007. – V.290. – P. 125-137.
123. Лазарев, С.И. Научные основы электрохимических и баромембранных методов очистки, выделения и получения органических веществ из промышленных стоков: дисс. ... док. технич. наук [Текст] / С.И. Лазарев. – Тамбов: ТГТУ, 2001. – 543 с.

124. Лазарев, В.А. Разделение и концентрирование молочной сыворотки на ультрафильтрационных и обратноосмотических мембранах: дисс. ... канд. техн. наук. [Текст] / В.А. Лазарев. - М. РХТУ, 2015. - 119 с.
125. Кочетов, В.И. Расчет и проектирование мембранного агрегата для очистки сточных вод [Текст] / В.И. Кочетов, С.И. Лазарев, В.Ю. Попов, В.Ю. Богомолов // Вестник Тамбовского университета. Серия: естественные и технические науки. – 2014. – Т.19. Вып. 6. – С. 1883-1888.
126. Gavrilov, B.G. Regularities of the drying of lactulose solutions [Текст] / G.B. Gavrilov // Foods and raw materials. - 2013. - № 2. - P. 22-29.
127. Kochetov, V.I. Analysis of a combined type of membrane device for purification of industrial solutions by ultrafiltration [Текст] / V.I. Kochetov, S.I. Lazarev, V.Y. Bogomolov // Chemical and Petroleum Engineering. – 2015. – Vol. 50. № 11. – P. 700-706.
128. Богомолов, В.Ю. Методика оценки периода эффективной работы ультрафильтрационной мембраны УАМ-150 [Текст] / В.Ю. Богомолов, С.И. Лазарев, А.Е. Стрельников // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-27: сб. трудов XXVII Междунар. науч. конф. - Тамбов, 2014. - Т.7. - С. 35-38.
129. Богомолов, В.Ю. Расчет срока службы полимерной мембраны УАМ-150 при концентрировании подсырной сыворотки [Текст] / В.Ю. Богомолов, С.И. Лазарев, С.А. Вязовов // Нановите научни постижения – 2014: материали за X международна научна практична конференция. Т. 29. Химия и химически технологии. Физика. - София, 2014. - С. 76-78.
130. Богомолов, В.Ю. Оценка продолжительности работы ультрафильтрационной мембраны при концентрировании подсырной сыворотки [Текст] / В.Ю. Богомолов, В.И. Кочетов, С.И. Лазарев, С.А. Вязовов, К.К. Полянский // Вестник Российской академии сельскохозяйственных наук. – 2014. – № 4. – С. 69 - 71.

131. Кочаров, Р.Г. Расчет установок мембранного разделения жидких смесей [Текст] / Р.Г. Кочаров, Г.Г. Каграманов. – М.: РХТУ им. Д. И. Менделеева. — 2001. - 128 с.
132. Силков, Д.М. Разработка и исследование ультрафильтрационного аппарата для концентрирования молочных продуктов с применением промежуточной очистки мембраны: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.18.12 [Текст] / Силков Даниил Михайлович. – Кемерово, 2006. – 16 с.
133. Степанов, Р.Д. Расчет на прочность конструкций из пластмасс, работающих в жидких средах [Текст] / Р.Д. Степанов, О.Ф. Шленский. – М.: Машиностроение, 1981. – 136 с.
134. Богомолов, В.Ю. Вопросы теплопереноса в электробаромембранных аппаратах плоскокамерного типа [Текст] / В.Ю. Богомолов, С.И. Лазарев // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2013. – Т. 19. № 4. – С. 805 – 812.
135. Костюков, Д.М. Исследование процесса сушки наноконцентратов творожной сыворотки [Текст] / Д.М. Костюков, В.Г. Куленко, Н.Я. Дыкало, Е.М. Костюков, В.А. Шохалов, В.Б. Шевчук // Молочнохозяйственный вестник. 2012. - №3 (7). – С.72 – 75.
136. Кузнецов, В.В. Использование сухих молочных компонентов в пищевой промышленности: Справочник [Текст] / В.В. Кузнецов, Г.Г. Шилер. - СПб.: Гиорд, 2006. – 480 с.
137. Голубева, Л.В. Современная технология молока пастеризованного [Текст] / Л.В. Голубева, А.Н. Пономарева, К.К. Полянский. – Воронеж.: Изд-во ВГУ, 2001. – 104 с.
138. Пат. №2251446 РФ, МПК 7B01D63/06A. Мембранный аппарат для фильтрации вязких жидкостей [Текст] / Кретов И.Т., Востриков С.В., Ключников А.И., Ключникова Д.В.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО Воронежская государственная технологическая академия. - № 2004106068/15; заявл. 01.03.2004; опубл. 10.05.2005, Бюл. № 13.

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Методики проведения анализов

Метод формольного титрования для определения белка согласно ГОСТ 25179-90

Метод формольного титрования основан на нейтрализации карбоксильных групп моноаминодикарбоновых кислот молочных белков раствором гидроксида натрия, количество которого, затраченное на нейтрализацию, пропорционально массовой доле белков в растворе.

1. Реактивы

Натрия гидроокись, водный раствор с молярной концентрацией 0,1 моль/дм³, ТУ 6-09-2540;

Формальдегид, водный раствор с массовой долей 30%;

Вода дистиллированная по ГОСТ 6709.

2. Ход измерения

В стакан помещают 20 см³ исследуемого раствора и стержень магнитной мешалки. Стакан устанавливают на магнитную мешалку, включают двигатель мешалки и погружают электроды потенциометрического анализатора в молоко. Титруют раствором гидроксида натрия в стакан с исследуемым раствором до точки эквивалентности равной 9 единицам рН, подавая раствор по каплям начиная с рН 4 и делают 30-секундную выдержку после достижения точки эквивалентности. Определяют количество раствора щелочи, затраченной на нейтрализацию раствора, до внесения формальдегида, и вносят в стакан 5 см³ формальдегида.

По истечении 2-2,5 минут вновь титруют раствором гидроксида натрия в стакан с исследуемым раствором до точки эквивалентности равной 9 единицам рН, подавая раствор по каплям начиная с рН равное 4 и делают 30-секундную выдержку после достижения точки эквивалентности.

Параллельно проводят контрольный опыт по нейтрализации смеси 20 см³ воды и 5 см³ раствора формальдегида.

Массовую долю белка X (%) вычисляют по формуле:

$$X=(V_2-V_1-V_0)\cdot 0,96+X_1,$$

где V_2 - общее количество раствора щелочи, израсходованное на нейтрализацию, см^3 ; V_1 - количество раствора щелочи, израсходованное на нейтрализацию до внесения формальдегида (см^3); V_0 - количество раствора щелочи, израсходованное на контрольный опыт (см^3); 0,96 - эмпирический коэффициент ($\%/ \text{см}^3$); X_1 - поправка к результату измерения массовой доли белка (%).

Поправку X_1 (%) вычисляют по формуле $X_1=X_2-X_3$,

где X_2 - среднее арифметическое значение массовой доли белка, полученное по ГОСТ 23327 (%); X_3 - среднее арифметическое значение массовой доли белка, полученное формольным титрованием (%).

Погрешность измерений не превышает 10%.

Методика выполнения измерений массовой концентрации хлоридов (ПНД Ф 14.1;2.96-97)

Титриметрический метод определения массовой концентрации хлоридов основан на образовании труднорастворимого осадка хлорида серебра при прибавлении раствора нитрата серебра к анализируемой пробе. После полного осаждения хлоридов избыток ионов серебра реагирует с индикатором - хроматом-калия - с образованием красновато-оранжевого осадка хромата серебра. Титрование проводят в нейтральной или слабощелочной среде (рН 7 - 10), поскольку в кислой среде не образуется хромат серебра, а в сильнощелочной возможно образование оксида серебра Ag_2O .

1. Реактивы

Хлорид натрия, ГОСТ 4233;

Нитрат серебра, ГОСТ 1277;

Хромат калия, ГОСТ 4459;

Азотная кислота концентрированная, ГОСТ 4461;

Соляная кислота, ГОСТ 3118;
Гидроксид натрия, ГОСТ 4328;
Пероксид водорода, ГОСТ 10929;
Алюмокалиевые квасцы, ГОСТ 4329;
Аммиак водный, концентрированный, ГОСТ 3760;
Уголь активированный, ГОСТ 6217;
Хлорид кальция безводный (для эксикатора), ТУ 6-09-4711;
Бумага индикаторная универсальная, ТУ 6-09-1181;
Фильтры мембранные Владипор типа МФАС-МА или МФАС-ОС-2 (0,45 мкм), ТУ 6-55-221-1029-89 или фильтры бумажные обеззоленные «синяя лента», ТУ 6-09-1678;

Вода дистиллированная, ГОСТ 6709.

2. Приготовление растворов и реактивов

2.1. Раствор хлорида натрия, 0,05 моль/дм³ эквивалента.

Отвешивают 1,4610 г NaCl, предварительно прокаленного при 500 - 600 °С до полного удаления влаги, количественно переносят его в мерную колбу вместимостью 500 см³, растворяют в дистиллированной воде, доводят до метки и перемешивают. Раствор устойчив при хранении в плотно закрытой склянке не более 3 мес.

2.2. Раствор нитрата серебра, 0,02 моль/дм³ эквивалента.

3,40 г AgNO₃ растворяют в дистиллированной воде в мерной колбе вместимостью 1 дм³, доводят до метки и перемешивают. При наличии мути раствор отстаивают в течение нескольких дней и затем сливают с помощью сифона прозрачную жидкость в склянку из темного стекла для хранения. Срок хранения не более 2 мес.

Точную концентрацию раствора определяют титрованием стандартного раствора хлорида натрия не реже 1 раза в месяц.

2.3. Раствор нитрата серебра, 0,05 моль/дм³ эквивалента.

8,49 г AgNO₃ растворяют в дистиллированной воде в мерной колбе вместимостью 1 дм³, доводят до метки и перемешивают. При наличии мути

раствор отстаивают в течение нескольких дней и затем с помощью сифона переливают прозрачную жидкость в склянку из темного стекла для хранения. Срок хранения не более 2 мес.

Точную концентрацию раствора определяют титрованием стандартного раствора хлорида натрия не реже 1 раза в месяц.

2.4. Раствор нитрата серебра, 10 %.

10 г нитрата серебра AgNO_3 растворяют в 90 см^3 дистиллированной воды и прибавляют 1 - 2 капли концентрированной азотной кислоты. При появлении мути раствор отстаивают не менее суток, затем с помощью сифона переливают прозрачную жидкость в склянку из темного стекла для хранения. Срок хранения не более 3 мес.

2.5. Раствор хромата калия, 10 %.

50 г K_2CrO_4 растворяют в 150 см^3 дистиллированной воды, добавляют для удаления хлоридов 10 % раствор AgNO_3 до появления слабого красновато-оранжевого осадка, дают отстояться в течение суток и затем фильтруют через фильтр «белая лента». К фильтрату добавляют 300 см^3 дистиллированной воды и перемешивают. Хранят в склянке из темного стекла не более 3 мес.

2.6. Раствор азотной кислоты, 0,1 моль/дм³.

$3,5 \text{ см}^3$ концентрированной азотной кислоты HNO_3 растворяют в 500 см^3 дистиллированной воды. Раствор устойчив при хранении в плотно закрытой склянке в течение 3 мес.

2.7. Раствор азотной кислоты, 2 моль/дм³.

35 см^3 концентрированной азотной кислоты HNO_3 растворяют в 215 см^3 дистиллированной воды. Раствор устойчив при хранении в плотно закрытой склянке в течение 3 мес.

2.8. Раствор соляной кислоты, 1:3.

100 см^3 концентрированной соляной кислоты HCl добавляют к 300 см^3 дистиллированной воды и перемешивают. Раствор устойчив при хранении в плотно закрытой склянке в течение 3 мес.

2.9. Раствор гидроксида натрия, 0,4 %.

2 г NaOH растворяют в 500 см³ дистиллированной воды.

2.10. Раствор гидроксида натрия, 8 %.

40 г гидроксида натрия растворяют в 460 см³ дистиллированной воды.

Растворы гидроксида натрия устойчивы при хранении в плотно закрытой полиэтиленовой посуде в течение 2 мес.

3. Ход измерения

Перед выполнением определения хлоридов в пробе неизвестного состава проводят качественную оценку их содержания. Для этого к 5 см³ анализируемой воды добавляют 3 капли 10% раствора AgNO₃ и перемешивают. О содержании хлоридов судят по интенсивности помутнения пробы. В зависимости от предполагаемого содержания хлоридов выбирают объем пробы, отбираемый для титрования (таблица П1).

Таблица П1. Качественная оценка содержания хлоридов в воде и рекомендуемый для титрования объем пробы воды

Характер помутнения пробы	Ориентировочное содержание хлоридов, мг/дм ³	Рекомендуемый объем пробы, см ³
Слабая муть	1 - 10	100
Сильная муть	10 - 50	100
Плавающие хлопья	50 - 100	100
Оседающие хлопья	100 - 250	100
Белый объемистый осадок	250 - 800 или более 800	50 или 25

Титрование

В коническую колбу вместимостью 250 см³ помещают пробу, объем которой зависит от предполагаемого содержания хлоридов (см. табл. П1). Если объем пробы меньше 100 см³, то ее разбавляют до 100 см³ дистиллированной водой. Проба должна иметь величину рН 7 - 10, в противном случае доводят рН до этих значений с помощью раствора азотной кислоты 0,1 моль/дм³, или 0,4% раствором гидроксида натрия по универсальной индикаторной бумаге. Добавляют 1 см³ раствора хромата калия и при непрерывном перемешивании медленно титруют из бюретки

рабочим раствором нитрата серебра. При содержании хлоридов 50 мг/дм^3 и менее для титрования используют раствор нитрата серебра с концентрацией $0,02 \text{ моль/дм}^3$, более $50 \text{ мг/дм}^3 - 0,05 \text{ моль/дм}^3$ эквивалента.

При титровании вначале появляется белый осадок AgCl . При приближении к концу титрования возникает оранжевая окраска, скорость исчезновения которой замедляется по мере титрования. Конец титрования определяют по исчезающей при перемешивании оранжевой окраске, появляющейся от одной капли раствора AgNO_3 . Для установления конечной точки титрования целесообразно использовать «свидетель», в качестве которого используют недотитрованную пробу приблизительно с таким же содержанием хлоридов, как и в анализируемой пробе.

Повторяют титрование и если расхождение между параллельными титрованиями не более $0,05 \text{ см}^3$ при объеме нитрата серебра до 5 см^3 и не более $0,1 \text{ см}^3$ при объеме нитрата серебра более 5 см^3 , за результат принимают среднее значение объема раствора нитрата серебра. В противном случае повторяют титрование до получения допустимого расхождения результатов.

Одновременно с титрованием анализируемых проб для учета индикаторной ошибки выполняют титрование холостой пробы - 100 см^3 дистиллированной воды

Массовую концентрацию хлоридов в анализируемой пробе находят по формуле

$$X = \frac{35,45 \cdot (V - V_{\text{хол}}) \cdot C_{\text{Ag}} \cdot 1000}{V_1},$$

где X - массовая концентрация хлоридов в пробе, мг/дм^3 ; V - объем раствора нитрата серебра, израсходованного на титрование пробы, см^3 ; $V_{\text{хол}}$ - объем раствора нитрата серебра, израсходованного на титрование холостой пробы, см^3 ; C_{Ag} - концентрация раствора нитрата серебра, моль/дм^3 эквивалента; V_1 -

объем пробы, взятой для определения, см³; 35,45 - молярная масса эквивалента Cl⁻, г/моль.

Если массовая концентрация хлоридов в анализируемой пробе превышает верхнюю границу диапазона (250 мг/дм³), разбавляют пробу с таким расчетом, чтобы массовая концентрация хлоридов входила в регламентированный диапазон, и выполняют титрование.

Погрешность измерений не превышает 10%.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Таблица П2 – Экспериментальные и расчетные данные по коэффициенту распределения

Вещество	Тип мембраны	Т, К	С, кг/м ³	Коэффициент распределения		Погрешность расчета, %
				экспер.	расчет	
1	2	3	4	5	6	7
Сывороточные белки	УАМ-150	293	9	1,11	1,06	4,534314
		293	14	0,84	0,91	8,37136
		293	28	0,73	0,72	1,742192
		293	32	0,7	0,69	2,129371
		298	9	1,14	1,13	1,014729
		298	14	0,96	0,97	0,978223
		298	28	0,79	0,76	3,313022
		298	32	0,73	0,73	0,061528
		305	9	1,19	1,23	3,370287
		305	14	1,02	1,06	3,6015
		305	28	0,84	0,83	0,875034
		305	32	0,74	0,80	7,470954
		308	9	1,32	1,28	3,35851
		308	14	1,08	1,10	1,469921
		308	28	0,94	0,86	8,139386
		308	32	0,81	0,82	1,8199
	УПМ-100	293	9	0,87	0,87	0,382863
		293	14	0,71	0,75	5,414257
		293	28	0,62	0,60	3,940418
		293	32	0,58	0,57	1,06678
		298	9	0,97	0,94	2,991912
		298	14	0,82	0,81	0,720336
		298	28	0,67	0,64	4,459094
		298	32	0,61	0,61	1,231709
		305	9	1,01	1,04	2,804134
		305	14	0,87	0,90	3,365617
		305	28	0,71	0,71	0,601025
		305	32	0,63	0,68	7,872717
		308	9	1,12	1,09	3,290977
		308	14	0,92	0,94	1,867561
		308	28	0,80	0,74	7,313449
		308	32	0,69	0,71	2,835178

Продолжение таблицы П2.

1	2	3	4	5	6	7
Сывороточные белки	УПМ-К	293	9	1,98	1,87	5,48276
		293	14	1,48	1,60	8,381258
		293	28	1,28	1,26	1,608271
		293	32	1,20	1,20	0,17295
		298	9	2,01	1,99	0,896931
		298	14	1,69	1,71	1,026693
		298	28	1,39	1,34	3,559223
		298	32	1,28	1,28	0,039441
		305	9	2,09	2,17	3,832223
		305	14	1,80	1,86	3,334565
		305	28	1,48	1,46	1,324562
		305	32	1,30	1,39	7,223647
		308	9	2,32	2,25	3,022572
		308	14	1,90	1,93	1,495019
		308	28	1,65	1,51	8,237118
		308	32	1,43	1,45	1,059721
Минеральные соли	УАМ-150	293	0,14	1,67	1,69	1,009664
		293	0,21	1,50	1,53	1,877099
		293	0,7	1,39	1,32	5,327554
		293	1,1	1,20	1,28	6,685734
		298	0,14	1,82	1,79	1,820489
		298	0,21	1,66	1,63	1,869454
		298	0,7	1,48	1,40	5,431715
		298	1,1	1,31	1,36	3,812277
		305	0,14	1,91	1,95	1,621301
		305	0,21	1,74	1,77	1,570619
		305	0,7	1,58	1,52	3,86444
		305	1,1	1,40	1,48	5,532753
		308	0,14	2,01	2,01	0,070155
		308	0,21	1,85	1,83	0,889028
		308	0,7	1,62	1,57	2,781288
		308	1,1	1,50	1,53	1,999579

1	2	3	4	5	6	7	
Минеральные соли	УПМ-100	293	0,14	1,95	1,94	0,520158	
		293	0,21	1,75	1,84	4,70669	
		293	0,7	1,62	1,57	3,427267	
		293	1,1	1,40	1,48	5,579703	
		298	0,14	2,09	2,03	3,07946	
		298	0,21	1,94	1,92	0,744188	
		298	0,7	1,73	1,64	5,064137	
		298	1,1	1,53	1,55	1,105941	
		305	0,14	2,17	2,16	0,761526	
		305	0,21	1,98	2,05	3,511626	
		305	0,7	1,80	1,75	2,761523	
		305	1,1	1,59	1,65	3,558206	
		308	0,14	2,19	2,21	1,241437	
		308	0,21	2,08	2,10	0,800797	
		308	0,7	1,91	1,79	6,168902	
		308	1,1	1,62	1,69	4,351028	
		УПМ-К	293	0,14	2,22	2,23	0,164103
			293	0,21	2,00	2,11	5,125987
	293		0,7	1,86	1,78	3,860001	
	293		1,1	1,60	1,68	4,772242	
	298		0,14	2,42	2,33	3,760655	
	298		0,21	2,20	2,20	0,096835	
	298		0,7	1,97	1,87	5,068873	
	298		1,1	1,74	1,75	0,779271	
	305		0,14	2,51	2,48	1,12301	
	305		0,21	2,28	2,34	2,840203	
	305		0,7	2,00	1,99	0,725424	
	305		1,1	1,84	1,87	1,375813	
	308		0,14	2,56	2,55	0,700836	
	308		0,21	2,35	2,41	2,340396	
	308	0,7	2,06	2,04	1,207901		
	308	1,1	1,91	1,91	0,237471		

Таблица ПЗ – Экспериментальные и расчетные данные по коэффициенту диффузионной проницаемости и диффузионному потоку

Вещество	Тип мембраны	Т, К	С, кг/м ³	Диффузионный поток, кг/(м ² ·с)	Коэффициент диффузионной проницаемости, м ² /с		Погрешность расчета, %
					экспер.	расчет	
1	2	3	4	5	6	7	8
Сывороточные белки	УАМ-150	293	9	$2,03 \cdot 10^{-8}$	$2,47 \cdot 10^{-12}$	$2,37 \cdot 10^{-12}$	3,866648
		293	14	$2,85 \cdot 10^{-8}$	$2,28 \cdot 10^{-12}$	$2,29 \cdot 10^{-12}$	0,192598
		293	28	$5,03 \cdot 10^{-8}$	$2,05 \cdot 10^{-12}$	$2,06 \cdot 10^{-12}$	0,176764
		293	32	$5,41 \cdot 10^{-8}$	$1,97 \cdot 10^{-12}$	$2,00 \cdot 10^{-12}$	1,357341
		298	9	$2,05 \cdot 10^{-8}$	$2,49 \cdot 10^{-12}$	$2,44 \cdot 10^{-12}$	2,176009
		298	14	$2,94 \cdot 10^{-8}$	$2,35 \cdot 10^{-12}$	$2,35 \cdot 10^{-12}$	0,025076
		298	28	$5,18 \cdot 10^{-8}$	$2,12 \cdot 10^{-12}$	$2,11 \cdot 10^{-12}$	0,040876
		298	32	$5,62 \cdot 10^{-8}$	$2,05 \cdot 10^{-12}$	$2,05 \cdot 10^{-12}$	0,164664
		305	9	$2,07 \cdot 10^{-8}$	$2,52 \cdot 10^{-12}$	$2,53 \cdot 10^{-12}$	0,564048
		305	14	$3,03 \cdot 10^{-8}$	$2,42 \cdot 10^{-12}$	$2,44 \cdot 10^{-12}$	0,779593
		305	28	$5,34 \cdot 10^{-8}$	$2,18 \cdot 10^{-12}$	$2,20 \cdot 10^{-12}$	0,763666
		305	32	$5,85 \cdot 10^{-8}$	$2,13 \cdot 10^{-12}$	$2,13 \cdot 10^{-12}$	1,35E-05
		308	9	$2,09 \cdot 10^{-8}$	$2,54 \cdot 10^{-12}$	$2,57 \cdot 10^{-12}$	1,158126
		308	14	$3,12 \cdot 10^{-8}$	$2,49 \cdot 10^{-12}$	$2,48 \cdot 10^{-12}$	0,593502
		308	28	$5,50 \cdot 10^{-8}$	$2,24 \cdot 10^{-12}$	$2,23 \cdot 10^{-12}$	0,609212
		308	32	$6,08 \cdot 10^{-8}$	$2,22 \cdot 10^{-12}$	$2,16 \cdot 10^{-12}$	2,310924
	293	9	$2,15 \cdot 10^{-8}$	$2,56 \cdot 10^{-12}$	$2,45 \cdot 10^{-12}$	4,173622	
	293	14	$3,03 \cdot 10^{-8}$	$2,37 \cdot 10^{-12}$	$2,36 \cdot 10^{-12}$	0,089688	
	293	28	$5,34 \cdot 10^{-8}$	$2,13 \cdot 10^{-12}$	$2,13 \cdot 10^{-12}$	1,79E-07	
	293	32	$5,79 \cdot 10^{-8}$	$2,06 \cdot 10^{-12}$	$2,07 \cdot 10^{-12}$	0,164538	
	298	9	$2,19 \cdot 10^{-8}$	$2,60 \cdot 10^{-12}$	$2,53 \cdot 10^{-12}$	2,848687	
	298	14	$3,12 \cdot 10^{-8}$	$2,44 \cdot 10^{-12}$	$2,44 \cdot 10^{-12}$	0,023108	
	298	28	$5,50 \cdot 10^{-8}$	$2,19 \cdot 10^{-12}$	$2,20 \cdot 10^{-12}$	0,112898	
	298	32	$6,02 \cdot 10^{-8}$	$2,15 \cdot 10^{-12}$	$2,13 \cdot 10^{-12}$	0,686586	
	305	9	$2,22 \cdot 10^{-8}$	$2,64 \cdot 10^{-12}$	$2,64 \cdot 10^{-12}$	0,177812	
	305	14	$3,21 \cdot 10^{-8}$	$2,51 \cdot 10^{-12}$	$2,54 \cdot 10^{-12}$	1,286219	
	305	28	$5,66 \cdot 10^{-8}$	$2,26 \cdot 10^{-12}$	$2,29 \cdot 10^{-12}$	1,377142	
	305	32	$6,26 \cdot 10^{-8}$	$2,23 \cdot 10^{-12}$	$2,22 \cdot 10^{-12}$	0,399433	
	308	9	$2,26 \cdot 10^{-8}$	$2,69 \cdot 10^{-12}$	$2,69 \cdot 10^{-12}$	2,72E-05	
	308	14	$3,31 \cdot 10^{-8}$	$2,58 \cdot 10^{-12}$	$2,59 \cdot 10^{-12}$	0,097305	
	308	28	$5,83 \cdot 10^{-8}$	$2,33 \cdot 10^{-12}$	$2,33 \cdot 10^{-12}$	0,187161	
	308	32	$6,45 \cdot 10^{-8}$	$2,30 \cdot 10^{-12}$	$2,26 \cdot 10^{-12}$	1,568561	

Продолжение таблицы ПЗ.

1	2	3	4	5	6	7	8
Сывороточные белки	УПМ-К	293	9	$1,97 \cdot 10^{-8}$	$2,68 \cdot 10^{-12}$	$2,64 \cdot 10^{-12}$	1,64177
		293	14	$2,77 \cdot 10^{-8}$	$2,48 \cdot 10^{-12}$	$2,53 \cdot 10^{-12}$	2,161647
		293	28	$4,87 \cdot 10^{-8}$	$2,23 \cdot 10^{-12}$	$2,25 \cdot 10^{-12}$	1,17262
		293	32	$5,34 \cdot 10^{-8}$	$2,18 \cdot 10^{-12}$	$2,18 \cdot 10^{-12}$	8,64E-05
		298	9	$2,01 \cdot 10^{-8}$	$2,74 \cdot 10^{-12}$	$2,70 \cdot 10^{-12}$	1,34568
		298	14	$2,85 \cdot 10^{-8}$	$2,55 \cdot 10^{-12}$	$2,59 \cdot 10^{-12}$	1,573825
		298	28	$5,01 \cdot 10^{-8}$	$2,30 \cdot 10^{-12}$	$2,31 \cdot 10^{-12}$	0,590489
		298	32	$5,55 \cdot 10^{-8}$	$2,27 \cdot 10^{-12}$	$2,23 \cdot 10^{-12}$	1,531475
		305	9	$2,05 \cdot 10^{-8}$	$2,79 \cdot 10^{-12}$	$2,79 \cdot 10^{-12}$	0,168766
		305	14	$2,94 \cdot 10^{-8}$	$2,63 \cdot 10^{-12}$	$2,68 \cdot 10^{-12}$	1,88744
		305	28	$5,16 \cdot 10^{-8}$	$2,36 \cdot 10^{-12}$	$2,39 \cdot 10^{-12}$	0,901068
		305	32	$5,77 \cdot 10^{-8}$	$2,36 \cdot 10^{-12}$	$2,31 \cdot 10^{-12}$	2,177183
		308	9	$2,07 \cdot 10^{-8}$	$2,82 \cdot 10^{-12}$	$2,83 \cdot 10^{-12}$	0,113215
		308	14	$3,03 \cdot 10^{-8}$	$2,71 \cdot 10^{-12}$	$2,71 \cdot 10^{-12}$	0,290444
		308	28	$5,32 \cdot 10^{-8}$	$2,44 \cdot 10^{-12}$	$2,42 \cdot 10^{-12}$	0,680467
		308	32	$5,89 \cdot 10^{-8}$	$2,41 \cdot 10^{-12}$	$2,34 \cdot 10^{-12}$	2,766455
Минеральные соли	УАМ-150	293	0,14	$0,03 \cdot 10^{-7}$	$11,16 \cdot 10^{-12}$	$10,94 \cdot 10^{-12}$	1,998556
		293	0,21	$0,04 \cdot 10^{-7}$	$10,62 \cdot 10^{-12}$	$10,77 \cdot 10^{-12}$	1,395545
		293	0,7	$0,10 \cdot 10^{-7}$	$9,74 \cdot 10^{-12}$	$9,64 \cdot 10^{-12}$	0,978124
		293	1,1	$0,11 \cdot 10^{-7}$	$8,78 \cdot 10^{-12}$	$8,82 \cdot 10^{-12}$	0,485581
		298	0,14	$0,03 \cdot 10^{-7}$	$11,55 \cdot 10^{-12}$	$11,45 \cdot 10^{-12}$	0,825412
		298	0,21	$0,04 \cdot 10^{-7}$	$11,09 \cdot 10^{-12}$	$11,28 \cdot 10^{-12}$	1,627411
		298	0,7	$0,10 \cdot 10^{-7}$	$10,13 \cdot 10^{-12}$	$10,10 \cdot 10^{-12}$	0,27453
		298	1,1	$0,12 \cdot 10^{-7}$	$9,30 \cdot 10^{-12}$	$9,24 \cdot 10^{-12}$	0,709851
		305	0,14	$0,04 \cdot 10^{-7}$	$12,13 \cdot 10^{-12}$	$12,20 \cdot 10^{-12}$	0,647514
		305	0,21	$0,04 \cdot 10^{-7}$	$11,82 \cdot 10^{-12}$	$12,01 \cdot 10^{-12}$	1,684135
		305	0,7	$0,11 \cdot 10^{-7}$	$10,64 \cdot 10^{-12}$	$10,76 \cdot 10^{-12}$	1,206577
		305	1,1	$0,12 \cdot 10^{-7}$	$9,63 \cdot 10^{-12}$	$9,84 \cdot 10^{-12}$	2,22515
		308	0,14	$0,04 \cdot 10^{-7}$	$12,73 \cdot 10^{-12}$	$12,54 \cdot 10^{-12}$	1,543241
		308	0,21	$0,05 \cdot 10^{-7}$	$12,41 \cdot 10^{-12}$	$12,34 \cdot 10^{-12}$	0,529183
		308	0,7	$0,11 \cdot 10^{-7}$	$11,27 \cdot 10^{-12}$	$11,06 \cdot 10^{-12}$	1,930343
		308	1,1	$0,13 \cdot 10^{-7}$	$10,11 \cdot 10^{-12}$	$10,11 \cdot 10^{-12}$	5,57E-05

1	2	3	4	5	6	7	8
Минеральные соли	УПМ-100	293	0,14	$0,04 \cdot 10^{-7}$	$11,48 \cdot 10^{-12}$	$11,30 \cdot 10^{-12}$	1,510622
		293	0,21	$0,05 \cdot 10^{-7}$	$11,13 \cdot 10^{-12}$	$11,14 \cdot 10^{-12}$	0,119595
		293	0,7	$0,12 \cdot 10^{-7}$	$10,21 \cdot 10^{-12}$	$10,10 \cdot 10^{-12}$	1,134954
		293	1,1	$0,14 \cdot 10^{-7}$	$9,20 \cdot 10^{-12}$	$9,31 \cdot 10^{-12}$	1,237881
		298	0,14	$0,04 \cdot 10^{-7}$	$11,88 \cdot 10^{-12}$	$11,83 \cdot 10^{-12}$	0,365014
		298	0,21	$0,05 \cdot 10^{-7}$	$11,63 \cdot 10^{-12}$	$11,67 \cdot 10^{-12}$	0,314939
		298	0,7	$0,13 \cdot 10^{-7}$	$10,62 \cdot 10^{-12}$	$10,57 \cdot 10^{-12}$	0,465818
		298	1,1	$0,15 \cdot 10^{-7}$	$9,75 \cdot 10^{-12}$	$9,75 \cdot 10^{-12}$	7,54E-08
		305	0,14	$0,04 \cdot 10^{-7}$	$12,47 \cdot 10^{-12}$	$12,60 \cdot 10^{-12}$	1,068288
		305	0,21	$0,05 \cdot 10^{-7}$	$12,16 \cdot 10^{-12}$	$12,43 \cdot 10^{-12}$	2,244904
		305	0,7	$0,13 \cdot 10^{-7}$	$11,15 \cdot 10^{-12}$	$11,26 \cdot 10^{-12}$	0,966034
		305	1,1	$0,16 \cdot 10^{-7}$	$10,39 \cdot 10^{-12}$	$10,39 \cdot 10^{-12}$	0,009842
		308	0,14	$0,05 \cdot 10^{-7}$	$13,10 \cdot 10^{-12}$	$12,94 \cdot 10^{-12}$	1,150779
		308	0,21	$0,06 \cdot 10^{-7}$	$12,76 \cdot 10^{-12}$	$12,76 \cdot 10^{-12}$	2,82E-06
		308	0,7	$0,14 \cdot 10^{-7}$	$11,82 \cdot 10^{-12}$	$11,56 \cdot 10^{-12}$	2,182384
		308	1,1	$0,16 \cdot 10^{-7}$	$10,91 \cdot 10^{-12}$	$10,67 \cdot 10^{-12}$	2,185986
	293	0,14	$0,04 \cdot 10^{-7}$	$12,10 \cdot 10^{-12}$	$11,90 \cdot 10^{-12}$	1,681177	
	293	0,21	$0,04 \cdot 10^{-7}$	$11,62 \cdot 10^{-12}$	$11,72 \cdot 10^{-12}$	0,800408	
	293	0,7	$0,11 \cdot 10^{-7}$	$10,71 \cdot 10^{-12}$	$10,53 \cdot 10^{-12}$	1,708432	
	293	1,1	$0,13 \cdot 10^{-7}$	$9,65 \cdot 10^{-12}$	$9,65 \cdot 10^{-12}$	0,004265	
	298	0,14	$0,04 \cdot 10^{-7}$	$12,52 \cdot 10^{-12}$	$12,43 \cdot 10^{-12}$	0,765737	
	298	0,21	$0,05 \cdot 10^{-7}$	$12,15 \cdot 10^{-12}$	$12,24 \cdot 10^{-12}$	0,765376	
	298	0,7	$0,12 \cdot 10^{-7}$	$11,14 \cdot 10^{-12}$	$11,00 \cdot 10^{-12}$	1,270201	
	298	1,1	$0,13 \cdot 10^{-7}$	$10,04 \cdot 10^{-12}$	$10,08 \cdot 10^{-12}$	0,441564	
	305	0,14	$0,04 \cdot 10^{-7}$	$13,09 \cdot 10^{-12}$	$13,20 \cdot 10^{-12}$	0,825174	
	305	0,21	$0,05 \cdot 10^{-7}$	$12,69 \cdot 10^{-12}$	$13,00 \cdot 10^{-12}$	2,380834	
	305	0,7	$0,12 \cdot 10^{-7}$	$11,70 \cdot 10^{-12}$	$11,68 \cdot 10^{-12}$	0,165056	
	305	1,1	$0,14 \cdot 10^{-7}$	$10,39 \cdot 10^{-12}$	$10,71 \cdot 10^{-12}$	3,037838	
	308	0,14	$0,04 \cdot 10^{-7}$	$13,74 \cdot 10^{-12}$	$13,53 \cdot 10^{-12}$	1,519483	
	308	0,21	$0,05 \cdot 10^{-7}$	$13,33 \cdot 10^{-12}$	$13,33 \cdot 10^{-12}$	6,11E-07	
	308	0,7	$0,13 \cdot 10^{-7}$	$12,05 \cdot 10^{-12}$	$11,98 \cdot 10^{-12}$	0,593224	
	308	1,1	$0,14 \cdot 10^{-7}$	$10,91 \cdot 10^{-12}$	$10,98 \cdot 10^{-12}$	0,641726	
УПМ-К							

Таблица П4 – Экспериментальные и расчетные данные по коэффициенту задержания

Вещество	Тип мембраны	P, МПа	C, кг/м ³	Коэффициент задержания		Погрешность расчета, %
				экспер.	расчет	
1	2	3	4	5	6	7
Сывороточные белки	УАМ-150	0,35	9	0,96	0,95	1,143156
		0,5	9	0,95	0,94	0,714434
		0,8	9	0,92	0,92	0,062886
		1	9	0,91	0,91	0,234162
		1,5	9	0,88	0,88	0,202299
		2	9	0,86	0,85	0,659021
		0,35	14	0,94	0,94	0,059793
		0,5	14	0,93	0,93	0,129282
		0,8	14	0,91	0,91	0,230453
		1	14	0,89	0,90	0,405765
		1,5	14	0,86	0,87	1,091367
		2	14	0,84	0,84	0,124099
		0,35	28	0,92	0,92	0,434783
		0,5	28	0,91	0,91	0,32967
		0,8	28	0,89	0,89	0,11236
		1	28	0,88	0,88	0,228571
		1,5	28	0,84	0,85	0,833333
		2	28	0,82	0,82	0,365854
		0,35	32	0,90	0,90	0,129055
		0,5	32	0,89	0,89	0,319762
	0,8	32	0,87	0,87	0,501934	
	1	32	0,86	0,86	0,408163	
	1,5	32	0,82	0,83	0,844619	
	2	32	0,81	0,80	0,829516	
	0,35	9	0,98	0,96	1,687418	
	0,5	9	0,97	0,95	1,402686	
	0,8	9	0,94	0,94	0,27344	
	1	9	0,93	0,93	0,00164	
	1,5	9	0,91	0,91	0,265122	
	2	9	0,89	0,89	0,457448	
	0,35	14	0,97	0,94	2,579776	
	0,5	14	0,95	0,93	1,53911	
	0,8	14	0,93	0,92	0,635184	
	1	14	0,91	0,91	0,087	
	1,5	14	0,89	0,89	0,419917	
	2	14	0,87	0,87	0,264763	
0,35	28	0,95	0,92	3,126316		
0,5	28	0,93	0,91	1,72043		
0,8	28	0,91	0,90	0,945055		
1	28	0,90	0,89	0,223464		
	УПМ-100					

Продолжение таблицы П4.

1	2	3	4	5	6	7
Сывороточные белки	УПМ-100	1,5	28	0,87	0,87	0,229885
		2	28	0,85	0,85	0,117647
		0,35	32	0,93	0,91	2,461887
		0,5	32	0,91	0,90	0,956284
		0,8	32	0,89	0,89	0,198162
		1	32	0,88	0,88	0,102611
		1,5	32	0,85	0,86	0,413606
		2	32	0,84	0,84	0,149298
	УПМ-К	0,35	9	0,87	0,85	2,028026
		0,5	9	0,85	0,85	0,831199
		0,8	9	0,83	0,83	0,574324
		1	9	0,82	0,83	1,165783
		1,5	9	0,79	0,81	1,310997
		2	9	0,77	0,79	1,66262
		0,35	14	0,85	0,83	1,938803
		0,5	14	0,84	0,83	1,241957
		0,8	14	0,82	0,81	0,269872
		1	14	0,80	0,81	0,786258
		1,5	14	0,78	0,79	1,165009
		2	14	0,76	0,77	1,153012
		0,35	28	0,83	0,81	2,289157
		0,5	28	0,82	0,81	1,226994
		0,8	28	0,80	0,79	0,875
		1	28	0,78	0,79	0,641026
		1,5	28	0,76	0,77	0,657895
		2	28	0,74	0,75	0,675676
		0,35	32	0,81	0,79	2,455266
		0,5	32	0,80	0,79	1,312481
		0,8	32	0,78	0,77	0,591564
		1	32	0,76	0,77	0,078493
		1,5	32	0,75	0,75	0,075111
		2	32	0,73	0,73	0,535053
Минеральные соли	УАМ-150	0,5	9	0,30	0,28	9,060847
		0,8	9	0,22	0,25	9,636541
		1	9	0,21	0,23	8,001503
		1,5	9	0,20	0,21	4,267375
		2	9	0,19	0,18	6,204079
		0,5	14	0,25	0,23	8,730159
		0,8	14	0,19	0,21	6,498975
		1	14	0,18	0,19	7,954545
		1,5	14	0,16	0,17	4,367873
		2	14	0,16	0,15	8,575032
		0,5	28	0,21	0,19	8,333333
		0,8	28	0,16	0,18	8,277405
		1	28	0,15	0,16	9,3125
		1,5	28	0,13	0,14	3,666895
		2	28	0,13	0,12	7,692308

Продолжение таблицы П4.

1	2	3	4	5	6	7
Минеральные соли	УАМ-150	0,5	32	0,16	0,16	1,817043
		0,8	32	0,12	0,13	9,166667
		1	32	0,12	0,13	7,421875
		1,5	32	0,11	0,11	0,060078
		2	32	0,10	0,10	6,670596
	УПМ-100	0,5	9	0,32	0,30	6,881313
		0,8	9	0,25	0,27	8,884123
		1	9	0,25	0,27	7,786927
		1,5	9	0,24	0,25	0,457924
		2	9	0,23	0,22	3,044872
		0,5	14	0,26	0,26	3,409091
		0,8	14	0,21	0,23	7,593645
		1	14	0,21	0,22	6,269926
		1,5	14	0,20	0,21	4,230222
		2	14	0,19	0,18	4,807692
		0,5	28	0,22	0,22	2,272727
		0,8	28	0,18	0,19	5,769231
		1	28	0,17	0,19	8,129649
		1,5	28	0,16	0,17	1,510067
		2	28	0,15	0,14	3,75
		0,5	32	0,17	0,18	4,665072
		0,8	32	0,14	0,15	9,871085
		1	32	0,14	0,15	9,590861
		1,5	32	0,13	0,13	5,059795
		2	32	0,09	0,10	8,854167
	УПМ-К	0,5	9	0,2952	0,2725	7,689702
		0,8	9	0,234668	0,25	6,533486
		1	9	0,219615	0,235	7,005441
		1,5	9	0,180048	0,1975	9,692971
		2	9	0,162382	0,16	1,466911
		0,5	14	0,246	0,2425	1,422764
		0,8	14	0,2023	0,22	8,749382
		1	14	0,1815	0,198	9,090909
		1,5	14	0,1452	0,157	8,126722
		2	14	0,1342	0,13	3,129657
		0,5	28	0,205	0,2125	3,658537
		0,8	28	0,17	0,185	8,823529
		1	28	0,15	0,165	10,00000
		1,5	28	0,12	0,13	8,333333
		2	28	0,11	0,1	9,090909
		0,5	32	0,1558	0,1525	2,1181
		0,8	32	0,1292	0,136	5,263158
1		32	0,12	0,125	4,166667	
1,5		32	0,0972	0,0975	0,308642	
2		32	0,0935	0,085	9,090909	

Таблица П5 – Экспериментальные и расчетные данные по коэффициенту задержания мембран с наложением электрических импульсов периодом 1 с при P = 1МПа.

Вещество	Тип мембраны	i, А/м ²	C, кг/м ³	Коэффициент задержания		Погрешность расчета, %
				экспер.	расчет	
1	2	3	4	5	6	7
Сывороточные белки	УАМ-150 прианод- ная	25	9	0,86	0,86	0,510852
		50	9	0,84	0,84	0,916552
		70	9	0,82	0,82	0,353368
		90	9	0,81	0,80	1,59573
		110	9	0,77	0,78	0,171525
		125	9	0,75	0,76	1,158984
		25	14	0,83	0,84	0,867315
		50	14	0,83	0,82	1,113532
		70	14	0,81	0,80	0,995019
		90	14	0,79	0,78	1,80405
		110	14	0,76	0,76	0,193239
		125	14	0,74	0,74	0,837139
		25	28	0,82	0,83	1,219512
		50	28	0,81	0,81	0,617284
		70	28	0,79	0,79	0,632911
		90	28	0,78	0,77	1,290323
		110	28	0,74	0,75	0,675676
		125	28	0,72	0,73	1,388889
		25	32	0,80	0,81	1,605213
		50	32	0,79	0,79	0,197328
		70	32	0,77	0,77	0,264578
		90	32	0,76	0,75	1,382488
		110	32	0,73	0,73	0,421522
		125	32	0,71	0,71	0,676819
	25	9	0,87	0,89	1,834951	
	50	9	0,86	0,87	0,169999	
	70	9	0,84	0,85	0,565665	
	90	9	0,83	0,83	0,451359	
	110	9	0,81	0,81	0,00473	
	125	9	0,78	0,79	0,946018	
	25	14	0,86	0,87	0,741084	
	50	14	0,85	0,85	0,188991	
70	14	0,83	0,83	0,04725		
90	14	0,81	0,81	0,824817		
110	14	0,79	0,79	0,148823		
125	14	0,77	0,77	0,456621		
25	28	0,85	0,85	0		
50	28	0,83	0,83	0,60241		
70	28	0,81	0,81	0,617284		
90	28	0,80	0,79	1,257862		

Продолжение таблицы П5.

1	2	3	4	5	6	7
Сывороточные белки	УПМ-100 прианодная	110	28	0,77	0,77	0,649351
		125	28	0,75	0,75	0
		25	32	0,83	0,84	1,149979
		50	32	0,81	0,82	0,607347
		70	32	0,79	0,80	0,561627
		90	32	0,78	0,78	0,526248
		110	32	0,76	0,76	0,048983
		125	32	0,74	0,74	0,169205
	УПМ-К прианодная	25	9	0,76	0,77	0,790189
		50	9	0,75	0,75	0,338781
		70	9	0,72	0,73	0,039629
		90	9	0,71	0,71	0,835893
		110	9	0,69	0,69	0,729334
		125	9	0,67	0,67	0,327084
		25	14	0,75	0,76	1,431581
		50	14	0,73	0,73	0,255842
		70	14	0,71	0,71	0,322445
		90	14	0,70	0,69	0,764017
		110	14	0,67	0,67	0,424421
		125	14	0,65	0,66	0,293542
		25	28	0,73	0,74	1,506849
		50	28	0,72	0,72	0,13986
		70	28	0,70	0,70	0,571429
		90	28	0,68	0,68	0,588235
		110	28	0,66	0,66	0,606061
		125	28	0,64	0,64	0,15625
		25	32	0,71	0,73	1,793301
		50	32	0,70	0,70	0,452826
	70	32	0,68	0,68	0,088183	
	90	32	0,67	0,66	0,810324	
	110	32	0,65	0,64	0,997745	
	125	32	0,63	0,63	0,69797	
	УАМ-150 прикатодная	25	9	0,80	0,81	0,813259
		50	9	0,83	0,83	0,793251
		70	9	0,86	0,85	1,106241
		90	9	0,87	0,87	0,132853
110		9	0,89	0,89	0,921381	
125		9	0,91	0,90	0,859384	
25		14	0,79	0,79	0,770071	
50		14	0,81	0,82	1,10465	
70		14	0,84	0,83	1,047695	
90		14	0,86	0,85	0,521052	
110		14	0,88	0,87	0,877793	
125		14	0,89	0,88	0,300341	
25		28	0,77	0,78	1,168831	
50		28	0,79	0,80	1,455696	
70	28	0,83	0,82	0,666667		

Продолжение таблицы П5.

1	2	3	4	5	6	7
Сывороточные белки	УАМ-150 прикатод- ная	90	28	0,84	0,84	0,297619
		110	28	0,86	0,86	0,523256
		125	28	0,87	0,87	0,114943
		25	32	0,76	0,76	0,072516
		50	32	0,77	0,78	0,840011
		70	32	0,81	0,80	1,113173
		90	32	0,82	0,82	0,285422
		110	32	0,84	0,84	0,459874
	125	32	0,85	0,85	0,116472	
	УПМ-100 прикатод- ная	25	9	0,83	0,85	1,824503
		50	9	0,86	0,86	0,37171
		70	9	0,88	0,87	0,72232
		90	9	0,89	0,89	0,405119
		110	9	0,92	0,90	1,425588
		125	9	0,93	0,92	0,580609
		25	14	0,82	0,83	1,516634
		50	14	0,84	0,84	0,391773
		70	14	0,86	0,85	0,955671
		90	14	0,88	0,87	0,89463
		110	14	0,90	0,88	1,682264
		125	14	0,91	0,90	1,574803
		25	28	0,80	0,81	1,25
		50	28	0,82	0,82	0,060976
		70	28	0,85	0,83	1,242604
		90	28	0,86	0,85	1,337209
		110	28	0,88	0,86	1,988636
		125	28	0,90	0,88	2,222222
		25	32	0,79	0,79	0,253807
		50	32	0,80	0,80	0,487308
	70	32	0,83	0,81	1,642314	
	90	32	0,84	0,83	1,293843	
	110	32	0,86	0,84	1,907135	
	125	32	0,88	0,86	2,194928	
	УПМ-К прикатод- ная	25	9	0,72	0,73	1,390469
		50	9	0,74	0,75	1,036249
		70	9	0,76	0,77	0,36452
		90	9	0,78	0,78	0,71116
		110	9	0,80	0,80	0,225992
		125	9	0,82	0,81	0,770499
		25	14	0,71	0,71	0,683513
		50	14	0,72	0,73	0,702156
		70	14	0,75	0,75	0,203339
90		14	0,76	0,76	0,294406	
110		14	0,78	0,78	0,781125	
125		14	0,80	0,79	0,801125	
25		28	0,69	0,70	1,449275	
50		28	0,71	0,72	1,408451	

Продолжение таблицы П5.

1	2	3	4	5	6	7
Сывороточные белки	УПМ-К прикатод- ная	70	28	0,73	0,74	0,821918
		90	28	0,75	0,75	0,266667
		110	28	0,77	0,77	0,392157
		125	28	0,78	0,78	1,42E-14
		25	32	0,68	0,68	0,051497
		50	32	0,70	0,70	0,50107
		70	32	0,72	0,72	0,083869
		90	32	0,73	0,73	0,411523
		110	32	0,75	0,75	0,182149
		125	32	0,76	0,76	0,27032
Минеральные соли	УАМ-150	50	0,14	0,13	0,14	8,024691
		70	0,14	0,06	0,06	8,97374
		90	0,14	0,04	0,04	7,330686
		110	0,14	0,02	0,02	5,487458
		125	0,14	0,01	0,01	2,23E-06
		50	0,21	0,11	0,10	9,259259
		70	0,21	0,05	0,05	6,658048
		90	0,21	0,03	0,03	7,142857
		110	0,21	0,02	0,02	1,896664
		125	0,21	0,01	0,01	1,639344
		50	0,7	0,09	0,08	6,666667
		70	0,7	0,04	0,05	5,769231
		90	0,7	0,03	0,03	0,833333
		110	0,7	0,01	0,01	5,035971
		125	0,7	0,01	0,01	1,39E-13
	50	1,1	0,07	0,06	6,432749	
	70	1,1	0,03	0,03	7,219973	
	90	1,1	0,02	0,02	1,785714	
	110	1,1	0,01	0,01	2,300382	
	125	1,1	0,01	0,01	2,171137	
	50	0,14	0,12	0,11	9,647551	
	70	0,14	0,06	0,06	3,844575	
	90	0,14	0,05	0,06	8,608432	
	110	0,14	0,04	0,04	8,97282	
	125	0,14	0,02	0,01	7,407692	
	50	0,21	0,10	0,09	7,34767	
	70	0,21	0,05	0,05	7,436226	
	90	0,21	0,04	0,05	9,771181	
	110	0,21	0,03	0,04	9,823063	
	125	0,21	0,01	0,01	9,34E-14	
	50	0,7	0,08	0,09	0,537634	
	70	0,7	0,04	0,04	9,465021	
90	0,7	0,04	0,04	6,632653		
110	0,7	0,03	0,02	9,77047		
125	0,7	0,01	0,01	0		
50	1,1	0,06	0,06	0,295541		
70	1,1	0,03	0,04	7,212476		

Продолжение таблицы П5.

1	2	3	4	5	6	7
Минеральные соли		90	1,1	0,03	0,03	0,552721
		110	1,1	0,02	0,02	8,857859
		125	1,1	0,01	0,01	8,67E-14
	УПМ-К	50	0,14	0,15	0,15	0,859788
		70	0,14	0,10	0,10	8,146707
		90	0,14	0,06	0,06	3,524349
		110	0,14	0,03	0,03	9,470808
		125	0,14	0,01	0,01	5,161902
		50	0,21	0,13	0,12	2,777778
		70	0,21	0,08	0,09	5,942377
		90	0,21	0,05	0,04	8,057851
		110	0,21	0,02	0,02	7,024793
		125	0,21	0,01	0,01	1,639344
		50	0,7	0,11	0,11	2,380952
		70	0,7	0,07	0,07	2,142857
		90	0,7	0,04	0,04	8,75
		110	0,7	0,02	0,02	4,75
		125	0,7	0,01	0,01	1,39E-13
		50	1,1	0,08	0,08	2,882206
		70	1,1	0,05	0,06	7,048872
		90	1,1	0,03	0,03	1,5625
		110	1,1	0,02	0,02	4,320988
		125	1,1	0,01	0,01	8,235294

Таблица Пб – Экспериментальные и расчетные данные по удельному потоку растворителя

Вещество	Тип мембраны	Р, МПа	С, кг/м ³	Удельный поток растворителя, м ³ /(м ² ·с)		Погрешность расчета, %
				экспер.	расчет	
1	2	3	4	5	6	7
Сывороточные белки	УАМ-150	0,8	9	0,46·10 ⁻⁶	0,47·10 ⁻⁶	0,072253
		1	9	0,48·10 ⁻⁶	0,48·10 ⁻⁶	0,045493
		1,5	9	0,49·10 ⁻⁶	0,49·10 ⁻⁶	0,023621
		2	9	0,51·10 ⁻⁶	0,51·10 ⁻⁶	0,015952
		0,8	14	0,45·10 ⁻⁶	0,45·10 ⁻⁶	0,060207
		1	14	0,46·10 ⁻⁶	0,46·10 ⁻⁶	0,037908
		1,5	14	0,48·10 ⁻⁶	0,48·10 ⁻⁶	0,019683
		2	14	0,49·10 ⁻⁶	0,49·10 ⁻⁶	0,013293
		0,8	28	0,44·10 ⁻⁶	0,44·10 ⁻⁶	0,026473
		1	28	0,45·10 ⁻⁶	0,45·10 ⁻⁶	0,016668
		1,5	28	0,46·10 ⁻⁶	0,46·10 ⁻⁶	0,008654
		2	28	0,48·10 ⁻⁶	0,48·10 ⁻⁶	0,005845
		0,8	32	0,41·10 ⁻⁶	0,41·10 ⁻⁶	0,016833
		1	32	0,43·10 ⁻⁶	0,43·10 ⁻⁶	0,010598
		1,5	32	0,44·10 ⁻⁶	0,45·10 ⁻⁶	2,038217
		2	32	0,46·10 ⁻⁶	0,46·10 ⁻⁶	0,003716
	УПМ-100	0,8	9	0,59·10 ⁻⁶	0,59·10 ⁻⁶	0,072253
		1	9	0,63·10 ⁻⁶	0,63·10 ⁻⁶	0,045493
		1,5	9	0,65·10 ⁻⁶	0,65·10 ⁻⁶	0,023621
		2	9	0,67·10 ⁻⁶	0,67·10 ⁻⁶	0,015952
		0,8	14	0,57·10 ⁻⁶	0,57·10 ⁻⁶	0,060207
		1	14	0,61·10 ⁻⁶	0,61·10 ⁻⁶	0,037908
		1,5	14	0,63·10 ⁻⁶	0,63·10 ⁻⁶	0,019683
		2	14	0,65·10 ⁻⁶	0,65·10 ⁻⁶	0,013293
		0,8	28	0,56·10 ⁻⁶	0,56·10 ⁻⁶	0,026473
		1	28	0,60·10 ⁻⁶	0,60·10 ⁻⁶	0,016668
		1,5	28	0,61·10 ⁻⁶	0,61·10 ⁻⁶	0,008654
		2	28	0,63·10 ⁻⁶	0,63·10 ⁻⁶	0,005845
		0,8	32	0,53·10 ⁻⁶	0,53·10 ⁻⁶	0,016833
		1	32	0,57·10 ⁻⁶	0,57·10 ⁻⁶	0,010598
		1,5	32	0,59·10 ⁻⁶	0,59·10 ⁻⁶	0,005503
		2	32	0,60·10 ⁻⁶	0,60·10 ⁻⁶	0,003716
	УПМ-К	0,8	9	0,51·10 ⁻⁶	0,51·10 ⁻⁶	0,072253
		1	9	0,53·10 ⁻⁶	0,53·10 ⁻⁶	0,045493
		1,5	9	0,55·10 ⁻⁶	0,55·10 ⁻⁶	0,023621
		2	9	0,56·10 ⁻⁶	0,56·10 ⁻⁶	0,015952
0,8		14	0,50·10 ⁻⁶	0,50·10 ⁻⁶	0,060207	
1		14	0,51·10 ⁻⁶	0,51·10 ⁻⁶	0,037908	
1,5		14	0,53·10 ⁻⁶	0,53·10 ⁻⁶	0,019683	
2		14	0,54·10 ⁻⁶	0,54·10 ⁻⁶	0,013293	

Продолжение таблицы П6.

1	2	3	4	5	6	7
Сывороточные белки	УПМ-К	0,8	28	$0,48 \cdot 10^{-6}$	$0,48 \cdot 10^{-6}$	0,026473
		1	28	$0,50 \cdot 10^{-6}$	$0,50 \cdot 10^{-6}$	0,016668
		1,5	28	$0,51 \cdot 10^{-6}$	$0,51 \cdot 10^{-6}$	0,008654
		2	28	$0,53 \cdot 10^{-6}$	$0,53 \cdot 10^{-6}$	0,005845
		0,8	32	$0,46 \cdot 10^{-6}$	$0,46 \cdot 10^{-6}$	0,016833
		1	32	$0,48 \cdot 10^{-6}$	$0,48 \cdot 10^{-6}$	0,010598
		1,5	32	$0,49 \cdot 10^{-6}$	$0,49 \cdot 10^{-6}$	0,005503
		2	32	$0,50 \cdot 10^{-6}$	$0,50 \cdot 10^{-6}$	0,003716

Таблица П7 – Экспериментальные и расчетные данные по удельному потоку растворителя с наложением электрических импульсов периодом 1 с при P = 1 МПа.

Вещество	Тип мембраны	i, А/м ²	C, кг/м ³	Удельный поток растворителя, м ³ /(м ² ·с)		Погрешность расчета, %
				экспер.	расчет	
1	2	3	4	5	6	7
Сывороточные белки	УАМ-150 прианодная	25	9	$0,40 \cdot 10^{-6}$	$0,41 \cdot 10^{-6}$	2,037326
		50	9	$0,46 \cdot 10^{-6}$	$0,45 \cdot 10^{-6}$	2,866651
		70	9	$0,48 \cdot 10^{-6}$	$0,48 \cdot 10^{-6}$	0,180255
		90	9	$0,51 \cdot 10^{-6}$	$0,51 \cdot 10^{-6}$	0,206044
		110	9	$0,55 \cdot 10^{-6}$	$0,54 \cdot 10^{-6}$	1,252131
		125	9	$0,56 \cdot 10^{-6}$	$0,56 \cdot 10^{-6}$	0,373844
		25	14	$0,39 \cdot 10^{-6}$	$0,39 \cdot 10^{-6}$	0,512332
		50	14	$0,44 \cdot 10^{-6}$	$0,43 \cdot 10^{-6}$	2,089584
		70	14	$0,47 \cdot 10^{-6}$	$0,46 \cdot 10^{-6}$	0,849048
		90	14	$0,49 \cdot 10^{-6}$	$0,49 \cdot 10^{-6}$	0,43056
		110	14	$0,53 \cdot 10^{-6}$	$0,52 \cdot 10^{-6}$	1,489126
		125	14	$0,54 \cdot 10^{-6}$	$0,54 \cdot 10^{-6}$	0,368223
		25	28	$0,38 \cdot 10^{-6}$	$0,37 \cdot 10^{-6}$	1,625434
		50	28	$0,41 \cdot 10^{-6}$	$0,41 \cdot 10^{-6}$	0,754351
		70	28	$0,45 \cdot 10^{-6}$	$0,44 \cdot 10^{-6}$	2,105818
		90	28	$0,48 \cdot 10^{-6}$	$0,47 \cdot 10^{-6}$	1,612441
		110	28	$0,51 \cdot 10^{-6}$	$0,50 \cdot 10^{-6}$	2,137184
		125	28	$0,53 \cdot 10^{-6}$	$0,52 \cdot 10^{-6}$	0,321267
		25	32	$0,36 \cdot 10^{-6}$	$0,35 \cdot 10^{-6}$	2,286551
		50	32	$0,39 \cdot 10^{-6}$	$0,39 \cdot 10^{-6}$	0,14233
		70	32	$0,43 \cdot 10^{-6}$	$0,42 \cdot 10^{-6}$	1,095682
		90	32	$0,46 \cdot 10^{-6}$	$0,45 \cdot 10^{-6}$	1,75329
		110	32	$0,48 \cdot 10^{-6}$	$0,48 \cdot 10^{-6}$	0,250638
		125	32	$0,50 \cdot 10^{-6}$	$0,50 \cdot 10^{-6}$	0,290615
	25	9	$0,51 \cdot 10^{-6}$	$0,54 \cdot 10^{-6}$	5,403837	
	50	9	$0,60 \cdot 10^{-6}$	$0,59 \cdot 10^{-6}$	2,153348	
	70	9	$0,64 \cdot 10^{-6}$	$0,63 \cdot 10^{-6}$	2,315162	

Продолжение таблицы П7.

1	2	3	4	5	6	7
Сывороточные белки	УПМ-100 прианод- ная	90	9	$0,68 \cdot 10^{-6}$	$0,67 \cdot 10^{-6}$	2,123067
		110	9	$0,71 \cdot 10^{-6}$	$0,71 \cdot 10^{-6}$	0,492073
		125	9	$0,72 \cdot 10^{-6}$	$0,74 \cdot 10^{-6}$	2,141643
		25	14	$0,50 \cdot 10^{-6}$	$0,52 \cdot 10^{-6}$	4,544991
		50	14	$0,57 \cdot 10^{-6}$	$0,57 \cdot 10^{-6}$	0,674255
		70	14	$0,62 \cdot 10^{-6}$	$0,61 \cdot 10^{-6}$	2,389588
		90	14	$0,66 \cdot 10^{-6}$	$0,65 \cdot 10^{-6}$	2,196109
		110	14	$0,68 \cdot 10^{-6}$	$0,69 \cdot 10^{-6}$	0,786472
		125	14	$0,70 \cdot 10^{-6}$	$0,72 \cdot 10^{-6}$	2,660633
		25	28	$0,48 \cdot 10^{-6}$	$0,50 \cdot 10^{-6}$	3,640275
		50	28	$0,54 \cdot 10^{-6}$	$0,55 \cdot 10^{-6}$	1,901774
		70	28	$0,61 \cdot 10^{-6}$	$0,59 \cdot 10^{-6}$	2,568807
		90	28	$0,65 \cdot 10^{-6}$	$0,63 \cdot 10^{-6}$	2,361624
		110	28	$0,66 \cdot 10^{-6}$	$0,67 \cdot 10^{-6}$	1,094675
		125	28	$0,68 \cdot 10^{-6}$	$0,70 \cdot 10^{-6}$	2,903027
		25	32	$0,46 \cdot 10^{-6}$	$0,48 \cdot 10^{-6}$	3,31402
		50	32	$0,52 \cdot 10^{-6}$	$0,53 \cdot 10^{-6}$	1,322787
		70	32	$0,57 \cdot 10^{-6}$	$0,57 \cdot 10^{-6}$	1,266929
		90	32	$0,62 \cdot 10^{-6}$	$0,61 \cdot 10^{-6}$	2,227489
		110	32	$0,64 \cdot 10^{-6}$	$0,65 \cdot 10^{-6}$	1,166825
	125	32	$0,65 \cdot 10^{-6}$	$0,68 \cdot 10^{-6}$	3,794894	
	25	9	$0,45 \cdot 10^{-6}$	$0,47 \cdot 10^{-6}$	4,559044	
	50	9	$0,50 \cdot 10^{-6}$	$0,51 \cdot 10^{-6}$	0,058958	
	70	9	$0,54 \cdot 10^{-6}$	$0,54 \cdot 10^{-6}$	0,715967	
	90	9	$0,57 \cdot 10^{-6}$	$0,57 \cdot 10^{-6}$	1,6765	
	110	9	$0,60 \cdot 10^{-6}$	$0,60 \cdot 10^{-6}$	1,622493	
	125	9	$0,62 \cdot 10^{-6}$	$0,62 \cdot 10^{-6}$	0,372355	
	25	14	$0,43 \cdot 10^{-6}$	$0,45 \cdot 10^{-6}$	3,088508	
	50	14	$0,48 \cdot 10^{-6}$	$0,49 \cdot 10^{-6}$	0,420557	
	70	14	$0,52 \cdot 10^{-6}$	$0,52 \cdot 10^{-6}$	1,369201	
	90	14	$0,56 \cdot 10^{-6}$	$0,55 \cdot 10^{-6}$	2,311687	
	110	14	$0,59 \cdot 10^{-6}$	$0,58 \cdot 10^{-6}$	1,887038	
	125	14	$0,60 \cdot 10^{-6}$	$0,60 \cdot 10^{-6}$	0,417934	
	25	28	$0,42 \cdot 10^{-6}$	$0,43 \cdot 10^{-6}$	1,534117	
	50	28	$0,46 \cdot 10^{-6}$	$0,47 \cdot 10^{-6}$	1,574876	
	70	28	$0,52 \cdot 10^{-6}$	$0,50 \cdot 10^{-6}$	4,061917	
	90	28	$0,54 \cdot 10^{-6}$	$0,53 \cdot 10^{-6}$	3,073477	
	110	28	$0,57 \cdot 10^{-6}$	$0,56 \cdot 10^{-6}$	2,174552	
	125	28	$0,58 \cdot 10^{-6}$	$0,58 \cdot 10^{-6}$	0,767512	
	25	32	$0,40 \cdot 10^{-6}$	$0,41 \cdot 10^{-6}$	2,803271	
	50	32	$0,44 \cdot 10^{-6}$	$0,45 \cdot 10^{-6}$	2,394028	
	70	32	$0,49 \cdot 10^{-6}$	$0,48 \cdot 10^{-6}$	1,554637	
90	32	$0,52 \cdot 10^{-6}$	$0,51 \cdot 10^{-6}$	1,817316		
110	32	$0,55 \cdot 10^{-6}$	$0,54 \cdot 10^{-6}$	1,058714		
125	32	$0,56 \cdot 10^{-6}$	$0,56 \cdot 10^{-6}$	1,103578		
25	9	$0,54 \cdot 10^{-6}$	$0,56 \cdot 10^{-6}$	4,339697		
50	9	$0,53 \cdot 10^{-6}$	$0,53 \cdot 10^{-6}$	0,100114		

Продолжение таблицы П7.

1	2	3	4	5	6	7
Сывороточные белки	УАМ-150 прикатод- ная	70	9	$0,50 \cdot 10^{-6}$	$0,50 \cdot 10^{-6}$	0,670691
		90	9	$0,48 \cdot 10^{-6}$	$0,47 \cdot 10^{-6}$	2,216771
		110	9	$0,45 \cdot 10^{-6}$	$0,44 \cdot 10^{-6}$	2,666324
		125	9	$0,38 \cdot 10^{-6}$	$0,41 \cdot 10^{-6}$	7,695256
		25	14	$0,52 \cdot 10^{-6}$	$0,54 \cdot 10^{-6}$	3,950626
		50	14	$0,51 \cdot 10^{-6}$	$0,51 \cdot 10^{-6}$	0,83081
		70	14	$0,48 \cdot 10^{-6}$	$0,48 \cdot 10^{-6}$	1,824517
		90	14	$0,46 \cdot 10^{-6}$	$0,45 \cdot 10^{-6}$	3,428021
		110	14	$0,42 \cdot 10^{-6}$	$0,42 \cdot 10^{-6}$	1,105629
		125	14	$0,37 \cdot 10^{-6}$	$0,39 \cdot 10^{-6}$	5,547878
		25	28	$0,51 \cdot 10^{-6}$	$0,52 \cdot 10^{-6}$	3,222013
		50	28	$0,49 \cdot 10^{-6}$	$0,49 \cdot 10^{-6}$	1,615327
		70	28	$0,47 \cdot 10^{-6}$	$0,46 \cdot 10^{-6}$	3,136968
		90	28	$0,45 \cdot 10^{-6}$	$0,43 \cdot 10^{-6}$	4,816921
		110	28	$0,39 \cdot 10^{-6}$	$0,40 \cdot 10^{-6}$	1,564519
		125	28	$0,36 \cdot 10^{-6}$	$0,37 \cdot 10^{-6}$	3,274901
		25	32	$0,48 \cdot 10^{-6}$	$0,50 \cdot 10^{-6}$	3,839886
		50	32	$0,46 \cdot 10^{-6}$	$0,47 \cdot 10^{-6}$	0,135428
		70	32	$0,45 \cdot 10^{-6}$	$0,44 \cdot 10^{-6}$	3,435541
		90	32	$0,42 \cdot 10^{-6}$	$0,41 \cdot 10^{-6}$	4,017064
	110	32	$0,37 \cdot 10^{-6}$	$0,38 \cdot 10^{-6}$	0,439596	
	125	32	$0,34 \cdot 10^{-6}$	$0,35 \cdot 10^{-6}$	2,549779	
	25	9	$0,70 \cdot 10^{-6}$	$0,73 \cdot 10^{-6}$	3,458033	
	50	9	$0,69 \cdot 10^{-6}$	$0,69 \cdot 10^{-6}$	0,029519	
	70	9	$0,66 \cdot 10^{-6}$	$0,65 \cdot 10^{-6}$	1,856598	
	90	9	$0,62 \cdot 10^{-6}$	$0,62 \cdot 10^{-6}$	1,063245	
	110	9	$0,56 \cdot 10^{-6}$	$0,58 \cdot 10^{-6}$	4,424715	
	125	9	$0,49 \cdot 10^{-6}$	$0,54 \cdot 10^{-6}$	9,962453	
	25	14	$0,68 \cdot 10^{-6}$	$0,70 \cdot 10^{-6}$	2,46505	
	50	14	$0,66 \cdot 10^{-6}$	$0,66 \cdot 10^{-6}$	1,348838	
	70	14	$0,64 \cdot 10^{-6}$	$0,62 \cdot 10^{-6}$	3,570716	
	90	14	$0,60 \cdot 10^{-6}$	$0,59 \cdot 10^{-6}$	2,861745	
	110	14	$0,52 \cdot 10^{-6}$	$0,55 \cdot 10^{-6}$	5,489561	
	125	14	$0,48 \cdot 10^{-6}$	$0,52 \cdot 10^{-6}$	9,905435	
	25	28	$0,66 \cdot 10^{-6}$	$0,67 \cdot 10^{-6}$	1,097747	
	50	28	$0,64 \cdot 10^{-6}$	$0,63 \cdot 10^{-6}$	2,76083	
	70	28	$0,63 \cdot 10^{-6}$	$0,59 \cdot 10^{-6}$	5,476009	
	90	28	$0,59 \cdot 10^{-6}$	$0,56 \cdot 10^{-6}$	4,87666	
	110	28	$0,50 \cdot 10^{-6}$	$0,52 \cdot 10^{-6}$	4,655373	
	125	28	$0,46 \cdot 10^{-6}$	$0,50 \cdot 10^{-6}$	7,582005	
	25	32	$0,63 \cdot 10^{-6}$	$0,65 \cdot 10^{-6}$	2,582219	
	50	32	$0,62 \cdot 10^{-6}$	$0,61 \cdot 10^{-6}$	2,154348	
70	32	$0,60 \cdot 10^{-6}$	$0,57 \cdot 10^{-6}$	4,770376		
90	32	$0,55 \cdot 10^{-6}$	$0,54 \cdot 10^{-6}$	2,95473		
110	32	$0,48 \cdot 10^{-6}$	$0,50 \cdot 10^{-6}$	4,847141		
125	32	$0,44 \cdot 10^{-6}$	$0,48 \cdot 10^{-6}$	8,349528		
		25	9	$0,60 \cdot 10^{-6}$	$0,63 \cdot 10^{-6}$	4,821877

Продолжение таблицы П7.

1	2	3	4	5	6	7
Сывороточные белки	УПМ-К прикатод- ная	50	9	$0,58 \cdot 10^{-6}$	$0,58 \cdot 10^{-6}$	0,211945
		70	9	$0,56 \cdot 10^{-6}$	$0,54 \cdot 10^{-6}$	3,357643
		90	9	$0,53 \cdot 10^{-6}$	$0,51 \cdot 10^{-6}$	3,412704
		110	9	$0,46 \cdot 10^{-6}$	$0,47 \cdot 10^{-6}$	2,161789
		125	9	$0,42 \cdot 10^{-6}$	$0,45 \cdot 10^{-6}$	5,045512
		25	14	$0,58 \cdot 10^{-6}$	$0,61 \cdot 10^{-6}$	4,816007
		50	14	$0,56 \cdot 10^{-6}$	$0,56 \cdot 10^{-6}$	0,569806
		70	14	$0,55 \cdot 10^{-6}$	$0,52 \cdot 10^{-6}$	4,117991
		90	14	$0,51 \cdot 10^{-6}$	$0,49 \cdot 10^{-6}$	4,246245
		110	14	$0,43 \cdot 10^{-6}$	$0,45 \cdot 10^{-6}$	4,192038
		125	14	$0,41 \cdot 10^{-6}$	$0,43 \cdot 10^{-6}$	3,334097
		25	28	$0,56 \cdot 10^{-6}$	$0,59 \cdot 10^{-6}$	4,492897
		50	28	$0,55 \cdot 10^{-6}$	$0,54 \cdot 10^{-6}$	0,956873
		70	28	$0,53 \cdot 10^{-6}$	$0,50 \cdot 10^{-6}$	5,010938
		90	28	$0,49 \cdot 10^{-6}$	$0,47 \cdot 10^{-6}$	5,232038
		110	28	$0,41 \cdot 10^{-6}$	$0,43 \cdot 10^{-6}$	4,461278
		125	28	$0,40 \cdot 10^{-6}$	$0,41 \cdot 10^{-6}$	1,523927
		25	32	$0,54 \cdot 10^{-6}$	$0,57 \cdot 10^{-6}$	5,565366
		50	32	$0,52 \cdot 10^{-6}$	$0,52 \cdot 10^{-6}$	0,857731
		70	32	$0,51 \cdot 10^{-6}$	$0,48 \cdot 10^{-6}$	4,880444
		90	32	$0,47 \cdot 10^{-6}$	$0,45 \cdot 10^{-6}$	4,002064
		110	32	$0,40 \cdot 10^{-6}$	$0,41 \cdot 10^{-6}$	3,776153
		125	32	$0,38 \cdot 10^{-6}$	$0,39 \cdot 10^{-6}$	1,270094

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Программа расчета кинетических характеристик ультрафильтрационного концентрирования и деминерализации подсырной сыворотки

```
#include <stdio.h>
#include <math.h>
#define ABS(X) ((X>0)?(X):- (X))

int main()
{
const long double tp=0.8;
const long double ksm=8.37e-2;
const long double dlp=0.5e-3;
const long double ksp=1.0e-7;
const long double e1=2/(d1*s);
const long double ve=6.0e-3;
const long double v1=3e-5;
const long double vf=3.3e-8;
const long double d_p=0.9e6;
const long double s=77.0e-4;
const long double nu=0.65;
const long double d1=1e-3;
const long double M=93.15;
const long double xm=1.45e-4;
const long double F=9.7e7;
const long double B=-0.007;
const long double n=1.81;
const long double A=2.62*10^(-12);
const long double cu=4190.0;
const long double ro=1000.0;
const long double cap=1250.0;
const long double map=14.3;
const long double vp1=d1*s;

printf("Концентрация сыворотки (kg/m3):");
long double c00;
scanf("%Lf",&c00);
printf("C=%9.4Lf\n", c00);
printf("Плотность импульсов тока (A/m^2):");
long double ip;
scanf("%Lf",&ip);
printf("i=%7.3Lf\n\n",ip);
puts("Ультрафильтрационное концентрирование и деминерализация подсырной сыворотки\n ");
puts("Мембрана УПМ-100\n");

c00=c00/M;
long double t1=20.0;
long double t2=t1;
const int n=7;
long double tau=0;
const long double tauk=4*3600;
const int dt=60;
int j=1200;
long double c0[8]; c0[0]=c00;
long double c[8]; c[0]=c00;
for(int i=1;i<n;i++) c0[i]=c00;
long double d[8]; d[0]=0;
```

```

long double alf[8], kz[8];
long double k[8], t[8], cf[8];

while(tau<tauk)
{
lab1:
for(int i=1;i<=n;i++)
{
const long double cpr=33.0;
long double c00=c0[i]*M;
const long double ep=0.685;
const long double eac=0.035;
long double dlt=xm;
const long double nn1=7.243;
const long double dl=1.0e-0.11;
const long double m1=1.25;
long double cm=nn1*expl(dl*logl(c00))*expl(m1*logl(20.0/tn));
long double km=cm/(c00);
long double kac=km;
long double n1=92.0/(tn*tn);
const long double a1=8657.0;
const long double b1=160.0;
long double l1=1.0-expl(-(1.0-eac)*(cpr-km*c00/kac)/cm);
long double ls=expl(c00*logl(l1)/cpr);
long double ppv=km*ls*b1*expl(n1*logl(c00))*expl(-a1/(273.0+tn));
const long double ab=0.933e-15;
const long double dltp=3.9e6;
long double aa1=5.6768e-7*expl(2194.1/(tn+273.0));
long double aa2=9.53e-4*km*c0/(1-eac);
long double aa3=9.53e-4*c0/ep;
long double ms=aa1+aa2;
long double mss=aa1+aa3;
long double pp=2.0*ab*l1*xm*dltp/(ms+mss);
alf[i]=pp/(dltp*xm);
kz[i]=1.0-ep*cm*ppv*expl(-cm/((1.0-eac)*(cpr-km*c00/kac)))/((1.0-
eac)*c00*pp);
k[i]=0.5*alf[i]*d_p*(1-kz[i])*s;
t[i]=2*tp*nu*ip/(dl*F);
long double dlt_o=1.0455^c00-1.0455^(c00*(1-kz[i]));
d[i]=d[i-1]+(alf[i]*d_p+alf[i]*dlt_o)*s;
c[i]=(e1*dt*(v1-k[i]-d[i-1])*c[i-1]-t[i]*dt-c[i-1]+c0[i-
1]+c0[i])/(1+e1*dt*(v1+k[i]-d[i]));
cf[i]=0.5*(t[i]*d1+(1-kz[i])*(c[i-
1]+c[i])*alf[i]*d_p)/(alf[i]*d_p);
printf("kz[%d]=%Lf\n",i,kz[i]);
printf("alf[%d]=%Lf\n",i,alf[i]);
}
long double ks=0.001*B*expl((1+n)*logl(c[n]*M))*expl(A/(t2+273))/M;
printf("ks=%Lf\n",ks);
long double
a=1.8*n*ip*ip*s*(dl/ks+xm/ksm+dltp/ksp+0.03/1.67)/(cu*ro*(d1*s*n+cap*map/(
cu*ro)));
long double b=(2*vp1-vf)/(d1*s*n+cap*map/(cu*ro));
printf("a=%Lf, b=%Le\n",a,b);
long double kp1,q1,kp2,q2,kp3,q3,kp4,q4;
kp1=(vf-vp1)*t2/(ve-vf*tau)+t1*(vp1-vf)/(ve-vf*tau)+a+b*(t1-t2);
q1=(vf-vp1)*t2/(ve-vf*tau)+t1*(vp1-vf)/(ve-vf*tau)+a+b*(t1-t2);
kp2=(vf-vp1)*(t2+dt*q1/2.0)/(ve-vf*(tau+dt/2.0))+(t1+dt*kp1/2.0)*(vp1-
vf)/(ve-vf*(tau+dt/2.0))+a+b*((t1+dt*kp1/2.0)-(t2+dt*q1/2.0));

```

```

    q2=(vf-vp1) * (t2+dt*q1/2.0) / (ve-vf*(tau+dt/2.0)) + (t1+dt*kp1/2.0) * (vp1-
vf) / (ve-vf*(tau+dt/2.0)) + a+b * ((t1+dt*kp1/2.0) - (t2+dt*q1/2.0));
    kp3=(vf-vp1) * (t2+dt*q2/2.0) / (ve-vf*(tau+dt/2.0)) + (t1+dt*kp2/2.0) * (vp1-
vf) / (ve-vf*(tau+dt/2.0)) + a+b * ((t1+dt*kp2/2.0) - (t2+dt*q2/2.0));
    q3=(vf-vp1) * (t2+dt*q2/2.0) / (ve-vf*(tau+dt/2.0)) + (t1+dt*kp2/2.0) * (vp1-
vf) / (ve-vf*(tau+dt/2.0)) + a+b * ((t1+dt*kp2/2.0) - (t2+dt*q2/2.0));
    kp4=(vf-vp1) * (t2+dt*q3/2.0) / (ve-vf*(tau+dt/2.0)) + (t1+dt*kp3/2.0) * (vp1-
vf) / (ve-vf*(tau+dt/2.0)) + a+b * ((t1+dt*kp3/2.0) - (t2+dt*q3/2.0));
    q4=(vf-vp1) * (t2+dt*q3/2.0) / (ve-vf*(tau+dt/2.0)) + (t1+dt*kp3/2.0) * (vp1-
vf) / (ve-vf*(tau+dt/2.0)) + a+b * ((t1+dt*kp3/2.0) - (t2+dt*q3/2.0));
    long double t11=t1+dt*(kp1+2.0*kp2+2.0*kp3+kp4)/6.0;
    long double t21=t2+dt*(q1+2.0*q2+2.0*q3+q4)/6.0;
    tau+=dt;
    t1=t11;
    t2=t21;
    long double z=(v1-d[n]) / (ve-d[n]*tau);
    long double c1v=(z*dt*c[n]+c0[0]) / (1+z*dt);
    if((tau==j) || (tau==dt))
    {
        printf("Время: tau=%6.0Lf сек. или %7.2Lf мин \n",tau,tau/60);
        printf("Температура: t1=%8.4Lf Tret=%8.4Lf \n\n",t1,t2);
        printf("Номер    C        Cпер    kz        \n");
        printf("камеры kg/m3    kg/m3        \n");
        for(int i=0;i<=n;i++)
        {
            if(i!=0)
            {
                printf("%d %10.5Lf %10.5Lf %9.3Lf \n",i,c[i]*M,
cf[i]*M,kz[i]);
            }
            else
            {
                printf("1    на входе \n");
                printf("    %10.5Lf \n",c[i]*M);
            }
        }
        for(int ii=1;ii<=80;ii++) printf("="); printf("\n\n");
        if(tau==j) j+=1200;
    }
    if(ABS(c1v-c[0])>(0.05*c1v))
    {
        c[0]=c1v;
        goto lab1;
    }
    else
    {
        c[0]=c1v;
        for(int i=0;i<=n;i++) c0[i]=c[i];
    }
}
return;
}

```

Результаты расчета по программе

Концентрация сыворотки (kg/m³):

9

C= 9.0000

Плотность импульсов тока (A/m²):

50

i=50.0000

Ультрафильтрационное концентрирование и деминерализация подсырной сыворотки

Мембрана УПМ-100

Время: tau=60 sek. или 1.00 мин

Температура: t1=20.0000 Tret=20.0825

Номер С Спер kz

камеры kg/m³ kg/m³

1 на входе

9.000000

1 9.022737 0.630000 0.930176

2 9.034135 0.630796 0.930176

3 9.039848 0.631195 0.930176

4 9.042712 0.631395 0.930176

5 9.044147 0.631495 0.930176

6 9.044867 0.631545 0.930176

7 9.045227 0.631570 0.930176

Время: tau=1200 sek. или 20.00 мин

Температура: t1=21.5675 Tret=21.6500

Номер С Спер kz

камеры kg/m³ kg/m³

1 на входе

9.859313

1 9.874885 0.788000 0.920202

2 9.887358 0.690371 0.920202

3 9.893611 0.690808 0.920202

4 9.896745 0.691026 0.920202

5 9.898316 0.691136 0.920202

6 9.899104 0.691191 0.920202

7 9.899499 0.691219 0.920202

Время: tau=2400 sek. или 40.00 мин

Температура: t1=21.5675 Tret=21.6500

Номер С Спер kz

камеры kg/m³ kg/m³

1 на входе

10.763853

1 10.791046 0.893400 0.917209

2 10.804678 0.894528 0.917209

3 10.811510 0.895094 0.917209

4 10.814935 0.895378 0.917209

5 10.816652 0.895520 0.917209

6 10.817513 0.895591 0.917209

7 10.817944 0.895627 0.917209

Время: tau=3600 sek. или 60.00 мин

Температура: t1=24.8675 Tret=24.9500

Номер С Спер kz

камеры kg/m³ kg/m³

1 на входе
 11.668393
 1 11.697872 1.003482 0.914217
 2 11.712648 1.004749 0.914217
 3 11.720055 1.005385 0.914217
 4 11.723768 1.005703 0.914217
 5 11.725629 1.005863 0.914217
 6 11.726562 1.005943 0.914217
 7 11.727030 1.005983 0.914217

Таблица П8 – Проверка адекватности модели.

Условия процесса: 28°C, давлении 1 МПа, импульс с плотностью тока 75 А/м² и периодом 1 с.

$C, \text{ кг/м}^3$	УАМ-150		УПМ-100		УПМ-К	
	K (экс)	K (рас)	K (экс)	K (рас)	K (экс)	K (рас)
9	0,862	0,862	0,880	0,882	0,765	0,771
14	0,842	0,846	0,870	0,866	0,758	0,753
28	0,826	0,818	0,845	0,842	0,730	0,726
32	0,806	0,814	0,832	0,837	0,714	0,721

Программа расчета влияния температуры на кинетические параметры ультрафильтрационного процесса

```
# include <stdio.h>
int main ()
{
double y, n, t, tk, i, rn, ro, l, s, r, q, p, mt, dt, c, t0, t1, n1, rn1,
ro1, l1, s1, r1, q1, a, b;
clrscr ();
y=0;
printf ("\n Для расчета системы Сталь/Молочная сыворотка введите 1");
scanf ("%lf",&y);
if (y==1)
{
ro=0.000000135;
c=3900;
ro1=2;
}
else
{
printf ("\n удельное сопротивление электрода (Ом*м) ="); scanf
("%lf",&ro);
printf ("\n удельная теплоемкость раствора (Дж/кг*К)="); scanf ("%lf",&c);
printf ("\n удельное сопротивление раствора (Ом*м)="); scanf ("%lf",&ro1);
}
printf ("\n Для расчета лабораторного аппарата введите 2"); scanf
("%lf",&y);
if (y==2)
{
n=5;
i=5;
l=0.13;
a=0.13;
l1=0.015;
b=0.005;
}
else
{
printf ("\n число электродов="); scanf("%lf",&n);
printf ("\n сила тока (А)="); scanf("%lf",&i);
printf ("\n высота одного электрода (м)="); scanf ("%lf",&l);
printf ("\n ширина одного электрода (м)="); scanf("%lf",&a);
printf ("\n расстояние между электродами (м)="); scanf ("%lf",&l1);
printf ("\n толщина одного электрода (м)="); scanf ("%lf",&b);
}
printf ("\n время процесса (сек)="); scanf ("%lf",&tk);
printf ("\n массовый расход раствора (кг/сек)="); scanf ("%lf",&mt);
printf ("\n начальная температура раствора (град.С)="); scanf ("%lf",&t0);

s=a*b;
rn=ro*l/s;
r=rn*n;
q=i*i*r*tk;
n1=n-1;
s1=l*a;
rn1=ro1*l1/s1;
r1=rn1*n1;
q1=i*i*r1*tk;
```

```

printf ("\n От электродов образуется общее количество тепла = %lf Дж",q);
printf ("\n От прохождения тока через раствор образуется общее количество
тепла = %lf Дж",q1);
q=q+q1;
p=0.00028*1.3*q/tk;
printf ("\n Аппарат при заданных параметрах соответствует проточному
нагревателю мощностью %lf Вт",p);
dt=p/(mt*c);
for (t=0; t<tk+1; t++)
{
t1=t0+dt;
if (t1>100)
{
printf("\n Перегрев!!! на %lf sec",t);
printf("\n Параметры перегрева:");
printf ("\n число электродов=%lf",n);
printf ("\n сила тока (А)=%lf",i);
printf ("\n удельное сопротивление электрода (Ом*м) =%lf",ro);
printf ("\n высота одного электрода (м)=%lf",l);
printf ("\n ширина одного электрода (м)=%lf",a);
printf ("\n расстояние между электродами (м)=%lf",l1);
printf ("\n толщина одного электрода (м)=%lf",b);
printf ("\n время процесса (сек)=%lf",t);
printf ("\n массовый расход раствора (кг/сек)=%lf",mt);
printf ("\n удельная теплоемкость раствора (Дж/кг*К)=%lf",c);
printf ("\n удельное сопротивление раствора (Ом*м)=%lf",ro1);
printf ("\n начальная температура раствора (град.С)=%lf",t0);
}
t0=(t0+t1)/2;
}
printf ("\n после %lf секунд процесса температура концентрата (град.С) =
%lf",tk,t1);

getch ();
return 0;
}

```

Результаты расчета по программе

Для расчета системы Сталь/Молочная сыворотка введите 1

0

удельное сопротивление электрода (Ом*м) =

0.000000135

удельная теплоемкость раствора (Дж/кг*К)=

3900

удельное сопротивление раствора (Ом*м)=

2

Для расчета лабораторного аппарата введите 2

0

число электродов=

5

сила тока (А)=

5

высота одного электрода (м)=

0.13

ширина одного электрода (м)=

0.13

расстояние между электродами (м)=

0.015

толщина одного электрода (м)=

0.005

время процесса (сек)=

3600

массовый расход раствора (кг/сек)=

0.003

начальная температура раствора (град.С)=

20

От электродов образуется общее количество тепла = 12.150000 Дж

От прохождения тока через раствор образуется общее количество тепла =

639053.24438 Дж

Аппарат при заданных параметрах соответствует проточному нагревателю

мощностью 0.064617 Вт

после 3600.000000 секунд процесса температура концентрата (град.С) =

29.946540

Для расчета системы Сталь/Молочная сыворотка введите 1

1

Для расчета лабораторного аппарата введите 2

2

время процесса (сек)=

5400

массовый расход раствора (кг/сек)=

0.003

начальная температура раствора (град.С)=

20

От электродов образуется общее количество тепла = 18.225000 Дж

От прохождения тока через раствор образуется общее количество тепла =

958579.881657 Дж

Аппарат при заданных параметрах соответствует проточному нагревателю

мощностью 0.064617 Вт

после 5400.000000 секунд процесса температура концентрата (град.С) =

34.917049

Для расчета системы Сталь/Молочная сыворотка введите 1

1

Для расчета лабораторного аппарата введите 2

2

время процесса (сек)=

7200

массовый расход раствора (кг/сек)=

0.003

начальная температура раствора (град.С)=

20

От электродов образуется общее количество тепла = 24.300000 Дж

От прохождения тока через раствор образуется общее количество тепла =

1278106.508876 Дж

Аппарат при заданных параметрах соответствует проточному нагревателю

мощностью 0.064617 Вт

после 7200.000000 секунд процесса температура концентрата (град.С) =

39.887558

Для расчета системы Сталь/Молочная сыворотка введите 1

1

Для расчета лабораторного аппарата введите 2

0

число электродов=

5

сила тока (А)=

2.5

высота одного электрода (м)=

0.13

ширина одного электрода (м)=

0.13

расстояние между электродами (м)=

0.015

толщина одного электрода (м)=

0.005

время процесса (сек)=

3600

массовый расход раствора (кг/сек)=

0.005

начальная температура раствора (град.С)=

20

От электродов образуется общее количество тепла = 3.037500 Дж

От прохождения тока через раствор образуется общее количество тепла =

159763.313609 Дж

Аппарат при заданных параметрах соответствует проточному нагревателю

мощностью 0.016154 Вт

после 3600.000000 секунд процесса температура концентрата (град.С) =

21.491981

Программа расчета периода эффективного функционирования ультрафильтрационных мембран при концентрировании подсырной сыворотки

```
# include <stdio.h>
# include <math.h>
int main ()
{
double y, F, a, b, p, q, sigma_k, R, m1, E1, m2, E2, t, h, D, dz, sigma_r,
Pd, C2, V2, C1, S, tau, Kr;
clrscr ();
printf ("\n Ввод данных о параметрах рассчитываемого аппарата:");
printf ("\n Ширина мембраны (мм) a="); scanf ("%lf",&a);
printf ("\n Длина мембраны (мм) b="); scanf ("%lf",&b);
printf ("\n Толщина мембраны (мм) h="); scanf ("%lf",&h);
printf ("\n Диаметр проволоки сетки (мм) D="); scanf ("%lf",&R);
R=R/2;
printf ("\n Перепад давления в системе (МПа) p="); scanf ("%lf",&p);
F=a*b*p;
if (b>a)
{q=F/a;}
else
{q=F/b;}
printf ("\n Сила, действующая на мембрану F=%lf Н",F);
printf ("\n Распределенная нагрузка по наименьшей стороне q=%lf Н/м",q);
y=0;
printf ("\n Для расчета системы *стальная проволока - ацетатцеллюлозная
мембрана* введите 1. Для расчета другой системы введите 2.");
scanf ("%lf",&y);
if (y==1)
{
m1=0.29;
E1=200000;
m2=0.5;
E2=2000;
sigma_r=130;
printf ("\n Для выбранной системы заданы следующие значения:");
printf ("\n Коэффициент Пуассона для материала проволоки m1=%lf",m1);
printf ("\n Модуль Юнга для материала проволоки E1=%lf МПа",E1);
printf ("\n Коэффициент Пуассона для материала мембраны m2=%lf",m2);
printf ("\n Модуль Юнга для материала мембраны E2=%lf МПа",E2);
printf ("\n Напряжение разрушения ацетата целлюлозы =%lf МПа",sigma_r);
}
else
{
printf ("\n Коэффициент Пуассона для материала проволоки m1=");
scanf("%lf",&m1);
printf ("\n Модуль Юнга для материала проволоки (МПа) E1=");
scanf("%lf",&E1);
printf ("\n Коэффициент Пуассона для материала мембраны m2="); scanf
("%lf",&m2);
printf ("\n Модуль Юнга для материала мембраны (МПа) E2=");
scanf("%lf",&E2);
printf ("\n Напряжение разрушения для материала мембраны (МПа) ="); scanf
("%lf",&sigma_r);
}
if (a>b) a=b;
sigma_k=0.564*sqrt((q/(a*R))/((1-m1*m1)/E1+(1-m2*m2)/E2));
```

```

printf ("\n Максимальные контактные напряжения на мембрану =%lf
МПа",sigma_k);
y=0;
printf ("\n Для учета набухания мембраны в физически активной среде
необходимо знать коэффициент диффузии разделяемой среды в материал
мембраны.");
printf ("\n Если коэффициент диффузии известен, введите 1. Если
коэффициент будет определен экспериментально (по данным исследования
диффузионной проницаемости) ? введите 2.");
scanf ("%lf",&y);
if (y==1)
{printf ("\n Коэффициент диффузии (м2/с*10^8) D="); scanf("%lf",&D);}
else
{
printf ("Введите параметры и результаты эксперимента:");
printf ("\n Объем раствора в одной камере (м3) V="); scanf("%lf",&V2);
printf ("\n Площадь рабочей поверхности мембраны в экспериментальной
установке (м2) S="); scanf("%lf",&S);
printf ("\n Концентрация растворенного вещества в исходном растворе
(кг/м3) C1="); scanf("%lf",&C1);
printf ("\n Концентрация растворенного вещества в дистиллированной воде
после проведения эксперимента (кг/м3) C2="); scanf("%lf",&C2);
printf ("\n Время проведения эксперимента (сек.) t="); scanf("%lf",&tau);
Pd=(C2*V2*h*100000000)/(S*1000*tau*(C1-C2));
printf ("\n Коэффициент распределения для исследуемой системы *мембрана-
раствор* K="); scanf("%lf",&Kr);
D=Pd/Kr;
printf ("\n Коэффициент диффузионной проницаемости Pd=%lf *10^-8
м2/с", Pd);
printf ("\n Коэффициент диффузии D=%lf *10^-8 м2/с",D);}
printf ("\n Коэффициент аппроксимации для вычисления срока службы мембраны
(рекомендуется 0.9) ="); scanf("%lf",&dz);
t=((31.4*h*h)/(4000*D*dz))*(1-(sigma_k/sigma_r))*(1-
(sigma_k/sigma_r))*1000000;
printf ("\n Минимальное время до разрушения мембраны составит %lf секунд
",t);
t=t/3600;
printf ("или %lf часов",t);
getch ();
return 0;
}

```

Результаты расчета по программе

Ввод данных о параметрах рассчитываемого аппарата:

Ширина мембраны (мм) a=

130

Длина мембраны (мм) b=

130

Толщина мембраны (мм) h=

0.1

Диаметр проволоки сетки (мм) D=

1

Перепад давления в системе (МПа) p=

1

Сила, действующая на мембрану F=16900.000000 Н

Распределенная нагрузка по наименьшей стороне q=130.000000 Н/м

Для расчета системы *стальная проволока - ацетатцеллюлозная мембрана* введите 1. Для расчета другой системы введите 2.

1

Для выбранной системы заданы следующие значения:

Коэффициент Пуассона для материала проволоки m1=0.290000

Модуль Юнга для материала проволоки E1=200000.000000 МПа

Коэффициент Пуассона для материала мембраны m2=0.500000

Модуль Юнга для материала мембраны E2=2000.000000 МПа

Напряжение разрушения ацетата целлюлозы =130.000000 МПа

Максимальные контактные напряжения на мембрану =40.939518 МПа

Для учета набухания мембраны в физически активной среде необходимо знать коэффициент диффузии разделяемой среды в материал мембраны.

Если коэффициент диффузии известен, введите 1. Если коэффициент будет определен экспериментально (по данным исследования диффузионной проницаемости) введите 2.

1

Коэффициент диффузии (м²/с*10⁸) D=

0.0001386

Коэффициент аппроксимации для вычисления срока службы мембраны (рекомендуется 0.9) =

0.9

Минимальное время до разрушения мембраны составит 295357.016972 секунд или 82.043616 часов

Ввод данных о параметрах рассчитываемого аппарата:

Ширина мембраны (мм) a=

130

Длина мембраны (мм) b=

130

Толщина мембраны (мм) h=

0.1

Диаметр проволоки сетки (мм) D=

1

Перепад давления в системе (МПа) p=

0.5

Сила, действующая на мембрану F=8450.000000 Н

Распределенная нагрузка по наименьшей стороне q=65.000000 Н/м

Для расчета системы *стальная проволока - ацетатцеллюлозная мембрана* введите 1. Для расчета другой системы введите 2.

1

Для выбранной системы заданы следующие значения:

Коэффициент Пуассона для материала проволоки m1=0.290000

Модуль Юнга для материала проволоки E1=200000.000000 МПа

Коэффициент Пуассона для материала мембраны m2=0.500000

Модуль Юнга для материала мембраны E2=2000.000000 МПа

Напряжение разрушения ацетата целлюлозы =130.000000 МПа
Максимальные контактные напряжения на мембрану =28.948611 МПа
Для учета набухания мембраны в физически активной среде необходимо знать коэффициент диффузии разделяемой среды в материал мембраны.
Если коэффициент диффузии известен, введите 1. Если коэффициент будет определен экспериментально (по данным исследования диффузионной проницаемости) введите 2.

1

Коэффициент диффузии ($\text{м}^2/\text{с} \cdot 10^8$) D=
0.0001386

Коэффициент аппроксимации для вычисления срока службы мембраны (рекомендуется 0.9) =
0.9

Минимальное время до разрушения мембраны составит 380243.490548 секунд или 105.623192 часов

Ввод данных о параметрах рассчитываемого аппарата:

Ширина мембраны (мм) a=
55

Длина мембраны (мм) b=
140

Толщина мембраны (мм) h=
0.1

Диаметр проволоки сетки (мм) D=
1

Перепад давления в системе (МПа) p=
0.1

Сила, действующая на мембрану F=770.000000 Н

Распределенная нагрузка по наименьшей стороне q=14.000000 Н/м

Для расчета системы *стальная проволока - ацетатцеллюлозная мембрана* введите 1. Для расчета другой системы введите 2.

1

Для выбранной системы заданы следующие значения:

Коэффициент Пуассона для материала проволоки $\mu_1=0.290000$

Модуль Юнга для материала проволоки $E_1=200000.000000$ МПа

Коэффициент Пуассона для материала мембраны $\mu_2=0.500000$

Модуль Юнга для материала мембраны $E_2=2000.000000$ МПа

Напряжение разрушения ацетата целлюлозы =130.000000 МПа

Максимальные контактные напряжения на мембрану =20.655010 МПа

Для учета набухания мембраны в физически активной среде необходимо знать коэффициент диффузии разделяемой среды в материал мембраны.

Если коэффициент диффузии известен, введите 1. Если коэффициент будет определен экспериментально (по данным исследования диффузионной проницаемости) введите 2.

1

Коэффициент диффузии ($\text{м}^2/\text{с} \cdot 10^8$) D=
0.0001386

Коэффициент аппроксимации для вычисления срока службы мембраны (рекомендуется 0.9) =
0.9

Минимальное время до разрушения мембраны составит 445220.337324 секунд или 123.672316 часов

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Пример расчета периода эффективной работы ультрафильтрационной мембраны в среде подсырной сыворотки

Рассчитаем период эффективной работы ультрафильтрационной мембраны УАМ-150 при концентрировании и деминерализации подсырной сыворотки.

На первом этапе необходимо изучить полученные ранее экспериментальные данные по диффузионным свойствам мембраны УАМ-150 в рассчитываемых условиях. При проведении эксперимента (см. Главу 3) были получены данные: объем растворителя, перешедшего через мембрану, составил $0,0045 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$; концентрации C_1 и C_2 соответственно $4,3 \text{ кг/м}^3$ и $0,0192 \text{ кг/м}^3$; толщина мембраны $\delta = 0,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

Подставив полученные данные в (2.1) получаем коэффициент диффузионной проницаемости $P_\delta = 0,693 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2/\text{с}$.

Для перехода к коэффициенту диффузии D воспользуемся выражением (3.4). В нашем случае был получен коэффициент диффузии $D = 1,386 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2/\text{с}$.

Размеры сторон мембраны a и b в рассматриваемом аппарате соответственно равны 55 мм и 140 мм. Подставляя эти значения в (4.22) получим:

$$F = 55 \text{ мм} \cdot 140 \text{ мм} \cdot 0,1 \text{ МПа} = 770 \text{ Н}. \quad (\text{П.1})$$

Вычисляем распределенную нагрузку на мембрану по наименьшей стороне (a) по формуле (4.23):

$$q = \frac{770 \text{ Н}}{55 \text{ мм}} = 14 \text{ Н / мм}. \quad (\text{П.2})$$

Согласно (4.24), для стальной проволоки диаметром 1 мм, максимальные контактные напряжения на ацетатцеллюлозную мембрану составят:

$$\sigma_{\kappa} = 0,564 \sqrt{\frac{\frac{14H / \text{мм}}{55\text{мм} \cdot 0,5\text{мм}}}{\frac{1-0,29^2}{2 \cdot 10^5 \text{МПа}} + \frac{1-0,5^2}{2000\text{МПа}}} = 20,65\text{МПа}, \quad (\text{П.3})$$

где для стали $\mu_1 = 0,29$; $E_1 = 2 \cdot 10^5$ МПа; для ацетата целлюлозы $\mu_2 = 0,5$; $E_2 = 2000$ МПа.

Зная σ_{κ} , можем определить время до разрушения мембраны, воспользовавшись уравнением (4.25):

$$\tau = \frac{3,14 \cdot 0,001^2 \text{ м}^2}{4 \cdot (1,386 \cdot 10^{-12}) \text{ м}^2/\text{с} \cdot 0,9} \left(1 - \frac{20,65\text{МПа}}{130\text{МПа}}\right)^2 \approx 123\text{ч}, \quad (\text{П.4})$$

где предел прочности для ацетата целлюлозы $\sigma_p = 130$ МПа.

Расчет по ступеням концентрирования ультрафильтрационного аппарата для концентрирования и деминерализации подсырной сыворотки для ООО «Бондарский сыродельный завод»

Рассчитаем установку для ультрафильтрационного концентрирования и деминерализации подсырной сыворотки, исходя из объемов ее образования в технологическом цикле Бондарского сыродельного завода. Для этого, разделим объем сыворотки, образующейся после разгрузки сыроизготовителей на четыре параллельных потока с таким расчетом, чтобы до поступления следующей партии сыворотки полностью переработать уже имеющуюся. Таким образом, необходимо спроектировать четыре аналогичные мембранные установки, производительностью по исходной сыворотке $V_{исх}=0,555$ кг/с каждая.

Исходная концентрация белка в сыворотке составляет $C_{1н}=0,9\%$ (масс.) белка, при содержании 0,01% неорганических солей. Концентрирование следует осуществлять до $C_{1к}=40\%$ (масс.) с последующей сушкой. Содержание белка в пермеате не должно превышать 0,3% (масс.).

Учитывая легкую сбраживаемость сыворотки при повышенных температурах, примем в качестве рабочей температуры $T = 293$ К. Классическим давлением в процессах ультрафильтрации является 0,1 – 2,0 МПа. Исходя из результатов экспериментальных исследований, примем перепад рабочего давления $\Delta P=1,0$ МПа.

По графику коэффициента задержания определим для мембраны УПМ-100 $K_{зад}=0,997$. В первом приближении примем, что наблюдаемая селективность равна истинной и вычислим степень концентрирования K .

$$K=C_{1к}/C_{1н}=44. \quad (П.5)$$

Тогда средняя концентрация белка в пермеате

$$C_{\text{пер}} = \frac{C_{1н} \left(1 - K \frac{1 - K_{\text{зад}}}{K_{\text{зад}}} \right)}{1 - K \frac{1}{K_{\text{зад}}}} = 0,01\%. \quad (\text{П.6})$$

Полученное значение ниже допустимых 0,3% белка в пермеате, поэтому выбираем рассматриваемую мембрану УПМ-100.

Определим удельный поток растворителя для данной мембраны

$$J = J_0 \cdot (1 - K_{\text{зад}}^{(-1/K_k)}) = 3,25 \cdot 10^{-3}, \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}) \quad (\text{П.7})$$

где J_0 - константа проницаемости по воде; K_k - коэффициент концентрирования.

Рабочая поверхность мембраны

$$F_m = \frac{V_{\text{пер}}}{J} = 167,4 \text{ м}^2. \quad (\text{П.8})$$

Расход концентрата

$$V_{\text{кон}} = V_{\text{исх}} - V_{\text{пер}} = 0,011 \text{ кг}/\text{с}. \quad (\text{П.9})$$

Поскольку нами разработан ультрафильтрационный плоскокамерный аппарат, позволяющий эффективно реализовывать процесс, рассчитаем аппарат данного типа. В данной конструкции примем толщина разделительной камеры $\delta_c=0,5$ мм, толщина дренажной сетки $\delta_d=0,4$ мм, толщина подложки и мембраны $\delta_1=0,2$ мм и $\delta_2=0,1$ мм, ширина прокладочного материала 0,025 м.

Рабочая поверхность каждого мембранного элемента

$$F_3 = 2 \cdot F_m = 0,25 \text{ м}^2, \quad (\text{П.10})$$

Определим общее количество элементов в аппарате

$$n = \frac{F_m}{F_3} = 670. \quad (\text{П.11})$$

Расход пермеата на каждом элементе

$$V_{\text{н.э.}} = \frac{V_{\text{н}}}{n} = 0,00081 \frac{\text{кг}}{\text{с}}. \quad (\text{П.12})$$

Проведем секционирование аппарата для выбора оптимального значения q . Примем $q=1,6$. Тогда

$$n_1 = \frac{V_{\text{всх}} \left(1 - \frac{1}{q}\right)}{V_{\text{н.з.}}} = 256, \quad (\text{П.13})$$

$$n_i = \frac{n_1}{q^{i-1}}, \quad (\text{П.14})$$

$$n_2 = 160, n_3 = 101, n_4 = 63, n_5 = 39,$$

$$n_6 = 24, n_7 = 15, n_8 = 10.$$

Суммарное число элементов

$$\sum_{i=1}^8 n_i = 668. \quad (\text{П.15})$$

Это значение на 2 единицы меньше необходимого числа элементов. Прибавим по одному элементу к первой и второй секциям. Тогда соотношение расходов будет

$$\frac{V_1}{V_m} = \frac{n_1 + q^{m-1}}{n_1 + 1} = 1,1. \quad (\text{П.16})$$

Для $q=1,4$

$$n_1 = 195,$$

$$n_2 = 140, n_3 = 100, n_4 = 71, n_5 = 51,$$

$$n_6 = 36, n_7 = 26, n_8 = 19, n_9 = 13,$$

$$n_{10} = 9, n_{11} = 7, n_{12} = 5.$$

Суммарное число элементов

$$\sum_{i=1}^{12} n_i = 671. \quad (\text{П.17})$$

Это значение на 1 единицы больше необходимого числа элементов. Вычтем один элемент из первой секции. Тогда соотношение расходов будет

$$\frac{V_1}{V_m} = \frac{n_1 + q^{m-1}}{n_1 + 1} = 1,2. \quad (\text{П.18})$$

Для $q=1,2$

$$n_1 = 114,$$

Суммарное число элементов

$$\sum_{i=1}^8 n_i = 671. \quad (\text{П.19})$$

Это значение на 1 единицы больше необходимого числа элементов. Вычтем один элемент из первой секции. Тогда соотношение расходов будет

$$\frac{V_1}{V_m} = \frac{n_1 + q^{m-1}}{n_1 + 1} = 1,4. \quad (\text{П.20})$$

По полученным данным построим график зависимости отношения расходов V_1/V_m и числа секций m от q . Из графика устанавливаем точку перегиба $q=1,4$. Однако, учитывая эффект снижения производительности мембран по мере концентрирования раствора, примем в качестве рабочего значение $q=1,6$. При этом средние расходы в каналах первой и последней секции составят

$$V_1 = \frac{V_{\text{вх}}(1+1/q)}{2(n_1+1)} = 0,00175, \quad (\text{П.21})$$

$$V_8 = \frac{V_{\text{к}}(q+1)}{2(n_8+1)} = 0,0013, \quad (\text{П.22})$$

$$\frac{V_1}{V_8} = 1,35. \quad (\text{П.23})$$

Отклонение этого значения от полученного ранее $(1,35-1,1) \cdot 100/1,1 = 23\%$. Учитывая, что число элементов в секциях округлялось до целых единиц, и к первой и второй секции добавлялись элементы, признаем такую сходимость удовлетворительной.

Найдем среднюю ширину сечения канала

$$b = 0,785l_m = 0,314 \text{ м}. \quad (\text{П.24})$$

Средняя скорость в первой секции

$$\omega_1 = \frac{V_1}{\rho \delta_c b} = 0,01096 \frac{\text{м}}{\text{с}}. \quad (\text{П.25})$$

$$d_3 = 2\delta_c = 1 \cdot 10^{-3} \text{ м}, \quad (\text{П.26})$$

$$Re_1 = \frac{\omega_1 d_3}{\nu} = 11,9. \quad (\text{П.27})$$

Режим течения – ламинарный. Определим критерий Pr'

$$Pr' = \frac{\nu}{D} = 1,31 \cdot 10^4. \quad (\text{П.28})$$

$$Nu'_1 = 1,67 Re^{0,34} (Pr')^{0,33} (d_3/l)^{0,3} = 14,7, \quad (\text{П.29})$$

$$\beta_1 = \frac{Nu'_1 D}{d_3} = 1,03 \cdot 10^{-6} \frac{\text{М}}{\text{с}}, \quad (\text{П.30})$$

$$U = \frac{J}{\rho} = 3,2 \cdot 10^{-6} \frac{\text{М}}{\text{с}}, \quad (\text{П.31})$$

Из уравнения

$$\lg \frac{1-K_{\text{зад}1}}{K_{\text{зад}1}} = \frac{U}{2,3\beta} + \lg \frac{1-K_{\text{зад}и}}{K_{\text{зад}и}} \quad (\text{П.32})$$

найдем $K_{\text{зад}1}=0,936$.

Для восьмой секции

$$\omega_8 = \frac{V_8}{\rho \delta_c b} = 0,0082 \frac{\text{М}}{\text{с}}. \quad (\text{П.33})$$

$$Re_8 = \frac{\omega_8 d_3}{\nu} = 8,92, \quad (\text{П.34})$$

$$Nu'_8 = 1,67 Re^{0,34} (Pr')^{0,33} (d_3/l)^{0,3} = 13,3, \quad (\text{П.35})$$

$$\beta_8 = \frac{Nu'_8 D}{d_3} = 0,93 \cdot 10^{-6} \frac{\text{М}}{\text{с}}, \quad (\text{П.36})$$

найдем $K_{\text{зад}8}=0,913$.

Среднее значение коэффициента задержания $K_{\text{зад}}=0,925$. Проверим пригодность выбранной мембраны по формуле (5.13). $C_2=0,22\%$. Полученное значение меньше допустимого, мембрана выбрана верно.

Расход пермеата составит $V_{\text{пер}}=0,547$ кг/с. Рабочая поверхность мембраны

$$F = \frac{V_{\text{пер}}}{J} = 168,3 \text{ м}^2. \quad (\text{П.37})$$

Расхождение с величиной в первом приближении $(167,4-168,3) \cdot 100/168,3 = 0,54\%$. Перерасчета не требуется.

Определим количество теплоты, образующейся от прохождения электрического импульса через аппарат за время реализации одного технологического цикла:

$$Q_{эл} = I^2 R \tau = 319,53 \text{ кДж} \quad (\text{П.38})$$

Тогда мощность нагрева составит:

$$P = 0,00028 \cdot k \cdot Q / \tau = 0,07 \text{ Вт} \quad (\text{П.39})$$

Величина нагрева к концу цикла составит:

$$\Delta T = \frac{P \cdot \tau}{m \cdot c} = 5,96 \text{ К} \quad (\text{П.40})$$

Следовательно, для эффективной реализации процесса необходимо обеспечить отвод тепла путем подачи охлаждающего агента.

Определим значение энергозатрат на процесс ультрафильтрационного концентрирования

$$W = 26,8(C_{кон} - C_{исх}) \cdot J + \frac{V_{пер} \cdot \Delta P}{\eta K} \approx 15 \text{ кВт} \cdot \text{ч} \quad (\text{П.41})$$

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



(19) **RU** ⁽¹¹⁾ **2 532 813** ⁽¹³⁾ **C1**

(51) МПК
B01D 61/42 (2006.01)
B01D 63/08 (2006.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2013121636/05, 07.05.2013
(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
07.05.2013
Приоритет(ы):
(22) Дата подачи заявки: 07.05.2013
(45) Опубликовано: 10.11.2014 Бюл. № 31
(56) Список документов, цитированных в отчете о
поиске: RU 2324529 С2, 20.05.2008; (см. прод.)
Адрес для переписки:
392000, г.Тамбов, Советская, 106, ФГБОУ ВПО
ТГТУ, Патентный отдел

(72) Автор(ы):
Лазарев Сергей Иванович (RU),
Ковалев Сергей Владимирович (RU),
Вязовов Сергей Александрович (RU),
Богомолов Владимир Юрьевич (RU)
(73) Патентообладатель(и):
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования
"Тамбовский государственный технический
университет" ФГБОУ ВПО ТГТУ (RU)

(54) ЭЛЕКТРОБАРОМЕМБРАННЫЙ АППАРАТ С ПЛОСКИМИ ФИЛЬТРУЮЩИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

(57) Реферат:

Изобретение относится к области разделения, концентрирования и очистки растворов методами электрогиперфильтрации, электромикрофильтрации, электроультрафильтрации и электронанофильтрации и может быть использовано в химической, текстильной, целлюлозно-бумажной, микробиологической, пищевой и других отраслях промышленности. Электробаромембранный аппарат с плоскими фильтрующими элементами включает первый и второй фланцы корпуса аппарата, выполненные с выступом и впадиной соответственно по плоской уплотнительной поверхности, между которыми имеются камеры корпуса с отверстиями для циркуляции раствора и прокладки, в которых также имеются отверстия для циркуляции раствора. Между первой и второй, третьей и четвертой, пятой и шестой, седьмой и восьмой камерами корпуса расположены с обеих сторон от паронитовых прокладок диэлектрические пластины, которые в паре образуют охлаждающую камеру. На камерах корпуса расположены штуцера для ввода и вывода охлаждающего агента, а на первом и втором фланцах корпуса имеются каналы и штуцера для

ввода и вывода раствора. В аппарате чередуются камеры разделения раствора и камеры охлаждения прикатодного и прианодного пермеата. На камерах корпуса имеются штуцера для отвода прикатодного и прианодного пермеата в зависимости от того, через какой монополярный пористый электрод и мембрану проходит пермеат. Для предотвращения утечек исходного и концентрированного раствора на внешней уплотнительной поверхности фланцев и камер корпуса имеются внешние паронитовые прокладки. Для обеспечения циркуляции разделяемого раствора в межмембранном пространстве и между фланцами корпуса и мембранами установлены паронитовые прокладки с отверстиями, совмещенными с цилиндрическими каналами камер корпуса. У поверхности мембран расположены ионообменные спейсеры, состоящие из гранул ионообменного вещества и сетки. Подвод электрического тока к монополярным пористым электродам осуществлен от источника питания постоянного тока через электрические провода и отверстия, расположенные в камерах корпуса и на фланце и заполненные герметизирующей композицией. Для обеспечения прочности и

Стр.: 1

RU 2 532 813 C1

RU 2 532 813 C1

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2013618596

**Расчет влияния температуры на кинетические параметры
электробаромембранного процесса**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Тамбовский государственный технический университет» (RU)*

Авторы: *Богомолов Владимир Юрьевич (RU), Лазарев Сергей Иванович (RU), Вязовов Сергей Александрович (RU)*

Заявка № 2013616573

Дата поступления 23 июля 2013 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 12 сентября 2013 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'B.P. Simonov', is written over a light-colored background.

Б.П. Симонов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2014615341

**Расчет технологических характеристик
ультрафильтрационного концентрирования подсырной
сыворотки**

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Тамбовский государственный технический университет» (RU)*

Авторы: *Богомолов Владимир Юрьевич (RU), Лазарев Сергей Иванович (RU), Кочетов Виктор Иванович (RU), Вязовов Сергей Александрович (RU)*

Заявка № 2014613122

Дата поступления 09 апреля 2014 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 26 мая 2014 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Б.П. Симонов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2015614888

**Расчет кинетических коэффициентов
электроромембранного извлечения органических веществ
из промышленных стоков**

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Тамбовский государственный технический университет» (RU)*

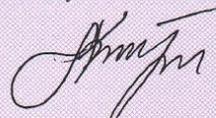
Авторы: *Лазарев Сергей Иванович (RU), Богомолов Владимир Юрьевич (RU), Казаков Вадим Геннадиевич (RU)*

Заявка № **2015611609**

Дата поступления **11 марта 2015 г.**

Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ **29 апреля 2015 г.**

*Врио руководителя Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

 **Л.Л. Кирий**



ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ «БОНДАРСКИЙ СЫРОДЕЛЬНЫЙ ЗАВОД»

393230, Тамбовская область, Бондарский район, с. Бондари, ул. Первомайская, 8
ОГРН 1086828000214 ИНН/КПП 6801003830/680101001
р/с 40702810902080000091 Тамбовский РФ ОАО «Россельхозбанк»
к/с 30101810600000000713 БИК 046850713
тел/ФАКС (47534) 25-327

АКТ о практическом применении результатов диссертационной работы Богомолова Владимира Юрьевича

В диссертационной работе Богомолова В.Ю. исследованы кинетические закономерности процесса ультрафильтрационного концентрирования и деминерализации подсырной сыворотки. Работа выполнена по государственным контрактам № 16.740.11.0525, 14.740.11.1028, 16.740.11.0659, и при поддержке ФГБУ «Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» (договоры гранта № 598ГУ1/2013, № 4929ГУ2/2014).

На основе полученных экспериментальных данных по коэффициенту задержания и удельному потоку растворителя для мембран УАМ-150, УПМ-100 и УПМ-К в зависимости от давления, концентрации раствора и характеристик электрического импульса, предложено усовершенствованное оборудование для целей переработки вторичного молочного сырья (патент № 2532813 RU) и усовершенствованная технологическая схема линии ультрафильтрационного концентрирования и деминерализации подсырной сыворотки.

Разработаны инженерные методики и программы для ЭВМ, позволяющие прогнозировать кинетические характеристики и технологические параметры процесса ультрафильтрационного концентрирования и деминерализации подсырной сыворотки. На программы для ЭВМ получены свидетельства о регистрации № 2013618596, № 2014615341 и № 2015614888.

Предложено внедрить на ООО «Бондарский сыродельный завод» усовершенствованную технологическую линию ультрафильтрационного концентрирования и деминерализации подсырной сыворотки, рассчитанную в диссертационной работе Богомолова В.Ю. Ожидаемый экономический эффект составит 500 тыс. руб. в год в ценах 2015 г.

И.о. генерального директора
ООО «Бондарский сыродельный завод»





ТАГАТ

имени С.И.
Лившица

ОАО «Тамбовгальванотехника»
имени С.И. Лившица
392030, РФ, г. Тамбов, Моршанское шоссе, 21.
Телефон: (4752) 53-25-03 приемная.
Факс: (4752) 45-04-15.
<http://www.tagat.ru>; <http://tagat.pф>
E-mail: market@tagat.ru; office@tagat.ru
ИНН/КПП: 6829008806/682901001

Акт о практическом применении результатов диссертационной работы Богомолова Владимира Юрьевича

Тема диссертационной работы Богомолова В.Ю. посвящена исследованию кинетических закономерностей и совершенствованию оборудования методов ультрафильтрационного концентрирования и деминерализации технологических растворов. Работа выполнена по государственным контрактам № 16.740.11.0525, 14.740.11.1028, 16.740.11.0659, а также при поддержке ФГБУ "Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере" (договоры гранта № 598ГУ1/2013 от 19.11.2013г., № 4929ГУ2/2014 от 25.12.2014г.) и проекта ТЕМПУС 530620-ТЕМПUS-1-2012-1-ИТ-ТЕМПUS-JPCR (2013 – 2014 г.г.) - обучение в области инновационных тех-нологий в сфере энергосбережения и экологического контроля в российских университетах с участием работодателей "GREEN MASTER".

Полученные Богомоловым В.Ю. научные результаты в диссертационных исследованиях по коэффициенту задержания и удельному потоку растворителя для полупроницаемых мембран УАМ-150, УПМ-100 и УПМ-К от давления, концентрации раствора и характеристик электрического импульса использованы при проектировании и производстве очистного оборудования на ОАО «ТАГАТ» им. С.И. Лившица.

Разработанный аппарат плоскокамерного типа (патент № 2532813 RU) и полученные свидетельства на ЭВМ (№2013618596, №2014615341, №2015614888) для расчета конструктивных и технологических параметров ультрафильтрационных аппаратов послужили практической и теоретической основой при проектировании ультрафильтрационных процессов для очистки технологических растворов.

Мембранный аппарат плоскокамерного типа является многофункциональным и позволяет одновременно выполнять несколько технологических задач - концентрирование, деминерализацию, охлаждение или нагрев технологических растворов.

Начальник ПДО
ОАО «ТАГАТ» им. С.И. Лившица



Казаков В.Г.