

*На правах рукописи*



**БОГОМОЛОВ Владимир Юрьевич**

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

05.18.12 – Процессы и аппараты пищевых производств

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Тамбов 2016

Работа выполнена в Научно-образовательном центре «Безотходные и малоотходные технологии» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Тамбовский государственный технический университет» (ФГБОУ ВПО «ТГТУ») – ФБГНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве».

**Научный руководитель**

доктор технических наук, профессор  
*Лазарев Сергей Иванович,*  
(ФГБОУ ВПО «Тамбовский государственный  
технический университет»)

**Официальные оппоненты:**

*Шапошник Владимир Алексеевич*  
доктор химических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», профессор кафедры «Аналитическая химия»

*Ключников Андрей Иванович,*  
кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», доцент кафедры «Машины и аппараты пищевых производств»

**Ведущая организация**

ГБУ ЯО «Ярославский государственный институт качества сырья и пищевых продуктов»  
(ГБУ ЯО «ЯГИКСПП», г. Ярославль)

Защита диссертации состоится 7 апреля 2016 г. в 13 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 212.035.01 при ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий» по адресу: 394036, г. Воронеж, проспект Революции, 19, конференц-зал.

Отзывы (в двух экземплярах) на автореферат, заверенные гербовой печатью учреждения, просим направлять в адрес диссертационного совета университета.

Автореферат размещен на официальных сайтах Высшей аттестационной комиссии при Министерстве образования и науки Российской Федерации (<http://www.vak2.ed.gov.ru>) и ФГБОУ ВО «ВГУИТ» (<http://www.vsuet.ru>) 27 января 2016 г.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте ФГБОУ ВО «ВГУИТ» (<http://www.vsuet.ru>). Полный текст диссертации размещен в сети Интернет на официальном сайте ФГБОУ ВО «ВГУИТ» (<http://www.vsuet.ru>) 14 декабря 2015 г.

Автореферат разослан 16 февраля 2016 г.

Ученый секретарь совета по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Д.212.035.01



Фролова Л. Н.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность исследования.** В процессе производства сыра образуются такие виды вторичного молочного сырья, как молочная подсырная сыворотка и промывные воды, содержащие молоко. По данным Международной молочной ассоциации, из 140 млн. т сыворотки, получаемой в мире, до 50% сливается на очистные сооружения. Но эта сыворотка богата белковыми компонентами, которые могут служить сырьем для производства различных пищевых продуктов.

Перспективными методами переработки вторичного молочного сырья являются мембранные методы. Поэтому разработка и научное обоснование современных процессов переработки молочной сыворотки на базе мембранных методов неразрывно связаны с повышением эффективности переработки молока в агропромышленном комплексе.

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-ТЕMPUS-1-2012-1-IT-ТЕMPУС-JPCR (2013–2014 гг.) – обучение в области инновационных технологий в сфере энергосбережения и экологического контроля в российских университетах с участием работодателей «GREEN MASTER».

**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.** 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.

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.

Разработан мембранный аппарат, работающий одновременно в трех технологических режимах – концентрирование, деминерализация и охлаждение или нагрев подсырной сыворотки. Новизна технического решения подтверждена патентом № 2532813 RU. 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.

Экспериментально определены рациональные условия реализации процесса ультрафильтрационного концентрирования и деминерализации подсырной сыво-

ротки с импульсным подводом тока: с применением ультрафильтрационных мембран УПМ-100 при давлении 1 МПа, с наложением электрических импульсов периодом 1 с, плотностью тока  $75 \text{ А/м}^2$  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. Расчетная себестоимость производства концентрата составляет 0,29 руб. на 1 руб. товарного продукта.

#### **Положения, выносимые на защиту.**

1. Кинетические и технологические закономерности 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); Международной научно-практической конференции «Наука и образование для устойчивого развития экономики, природы и общества» (Тамбов, 2013); Международной научно-практической конференции «Современные предпосылки развития инновационной экономики» (Тамбов, 2013); Международной научно-практической конференции «Новейшие научные достижения-2014» (Болгария, 2014); Международной научно-технической конференции «Техника и технологии-2014» (Брянск, 2014); Международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях» (Тамбов, 2014); конференции с международным участием «Иониты-2014» (Воронеж, 2014); Международной научной конференции «Теоретические и практические аспекты сорбционных и мембранных процессов» (Кемерово, 2014); Международной научно-инновационной молодежной конференции «Современные твердофазные техноло-

гии» (Тамбов, 2014); Международной научно-практической конференции «Современные проблемы теории машин» (Новокузнецк, 2015); Международной научной конференции «Актуальные проблемы энергосбережения и энергоэффективности в технических системах» (Тамбов, 2015).

**Публикации.** 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.

**Структура и объем диссертации.** 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.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Введение.** Обоснована актуальность темы диссертации, ее научная новизна и практическая значимость, сформулированы цель и задачи работы.

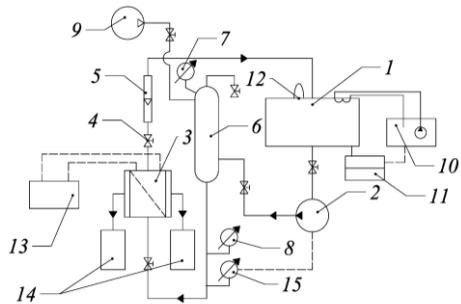
В **первой главе** проведен обзор литературных данных. Проанализированы существующие методы переработки вторичного молочного сырья. Рассмотрены кинетика процессов мембранного разделения растворов и основные характеристики мембран. На основании анализа литературных данных выявлены наиболее перспективные направления усовершенствования методов мембранной переработки вторичного молочного сырья.

**Вторая глава** посвящена описанию оборудования, объектов и методик экспериментальных исследований. Объектами для исследований служила подсырная сыворотка, получаемая при производстве сычужных сыров на Бондарском сыродельном заводе (Тамбовская область, с. Бондари) и модельные растворы цельного молока, а также ультрафильтрационные полупроницаемые мембраны УАМ-150, УПМ-100 и УПМ-К. 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. 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/м<sup>3</sup>, концентрации минеральных солей 0,14...1,1 кг/м<sup>3</sup> – 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.

Экспериментальные исследования коэффициента задержания и удельного потока растворителя производились на ультрафильтрационной установке, схема которой представлена на рис. 1.

**Рис. 1. Схема ультрафильтрационной установки для исследования удельного потока растворителя и коэффициента задержания**

- и удельного потока растворителя:**  
 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



Исходя из полученных экспериментально значений концентраций растворенного вещества в пермеате и в исходных растворах, рассчитывали коэффициент задержания по формуле

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

где  $C_{\text{пер}}$  – концентрация растворенных веществ в пермеате,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Коэффициент задержания исследовался для сывороточных белков и минеральных солей. С целью максимального извлечения минеральных солей из белкового концентрата, процесс ультрафильтрационного разделения исследовался с наложением электрических импульсов. Величины плотности тока и периода наложения импульса подбирались экспериментально так, чтобы обеспечить максимальное извлечение солей при минимально возможных проявлениях эффектов окисления и сбраживания молочного сырья.

Величину удельного потока растворителя определяли по формуле

$$J = \frac{V}{(F_M \tau)}, \quad (2)$$

где  $V$  – объем пермеата,  $\text{м}^3$ ;  $F_M$  – площадь мембраны,  $\text{м}^2$ ;  $\tau$  – время проведения эксперимента, с.

По концентрациям растворенного вещества в образцах ультрафильтрационных мембран и в исходных растворах рассчитывали коэффициент распределения по формуле

$$k_p = C_M / C_{\text{исх}}, \quad (3)$$

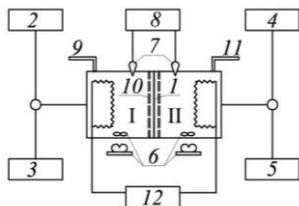
где  $C_M$ ,  $C_{\text{исх}}$  – равновесные концентрации растворенных веществ в мембране и исходном растворе,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Схема экспериментальной установки для исследований диффузионной проницаемости мембран приведена на рис. 2.

Расчет коэффициента диффузионной проницаемости осуществляли по формуле

$$P_d = \frac{C_2 V_2 \delta}{(C_1 - C_2) F_M \tau}, \quad (4)$$

где  $P_d$  – коэффициент диффузионной проницаемости,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $C_{1,2}$  – концентрации растворенного вещества в камерах экспериментальной ячейки, разделенных мембраной,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $\delta$  – толщина мембраны после набухания,  $\text{м}$ ;  $F_m$  – рабочая площадь поверхности мембраны,  $\text{м}^2$ ;  $\tau$  – время проведения эксперимента,  $\text{с}$ ;  $\Delta V$  – объем перенесенного растворителя из одной камеры в другую,  $\text{м}^3$ .



**Рис. 2.** Схема лабораторной установки для определения диффузионной проницаемости полимерных мембран:

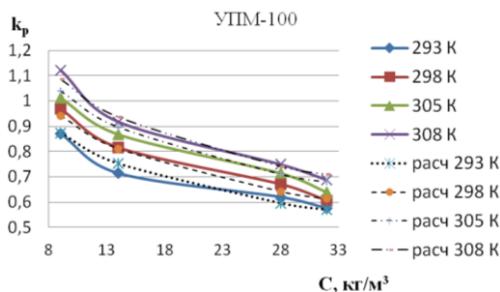
- 1 – мембрана; 2, 4 – емкости исходных растворов;
- 3, 5 – емкости отработанных растворов;
- 6 – магнитные мешалки; 7 – термодатчики;
- 8 – потенциометр; 9, 11 – измерительные капилляры; 10 – решетка; 12 – термостат

Для расчета диффузионного потока вещества использовалось выражение

$$m_{\text{диф}} = \frac{P_d}{\delta} (C_{\text{рет}} - C_{\text{пер}}), \quad (5)$$

где  $\delta$  – толщина мембраны после набухания,  $\text{м}$ ;  $C_{\text{рет}}$  и  $C_{\text{пер}}$  – концентрации растворенного вещества в ретентате и пермеате,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

**Третья глава** посвящена изложению и анализу результатов экспериментальных исследований. На этапе выбора мембран и предварительного определения условий проведения мембранного процесса важно изучение сорбционных характеристик мембран при работе в среде подсырной сыворотки (рис. 3 и 4).



**Рис. 3.** Зависимости коэффициента распределения ( $k_p$ ) от концентрации белка ( $C$ ,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ) и температуры ( $T$ ,  $\text{K}$ ) для ультрафильтрационных мембран УПМ-100

ный белок сорбируется ультрафильтрационными мембранами в меньшей степени.

Необходимым условием качественного концентрирования сывороточного белка является обессоливание концентрата. Были исследованы сорбционные характеристики мембран применительно к содержащимся в сыворотке минеральным солям (рис. 4).

Из зависимостей видно, что абсолютные величины коэффициента распределения солей выше, что объясняется меньшими размерами молекул минеральных солей по сравнению с белковыми молекулами. Для аналитического определения коэффициента распределения использовано выражение вида

$$k_p = (bC_{исх}^n (293/T)^m) / C_{исх} \quad (6)$$

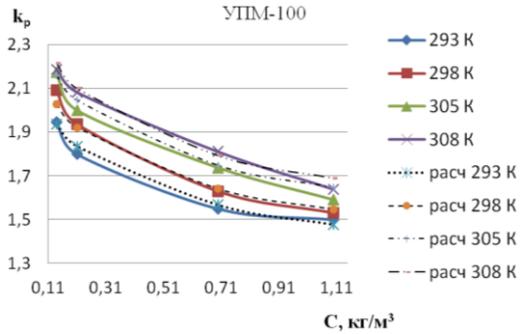


Рис. 4. Зависимости коэффициента распределения ( $k_p$ ) от концентрации минеральных солей ( $C$ ,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ) и температуры ( $T$ ,  $\text{К}$ ) для ультрафильтрационных мембран УПИМ-100

### 1. Значения эмпирических коэффициентов для уравнения 6

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

Большое значение имеют диффузионные свойства мембран по отношению к отдельным компонентам сыворотки. В рамках этой работы наибольший интерес представляет диффузионный поток белка и минеральных солей через мембрану. Были получены экспериментальные зависимости величины диффузионного потока для белковых молекул и минеральных солей (рис. 5) через исследуемые образцы мембран.

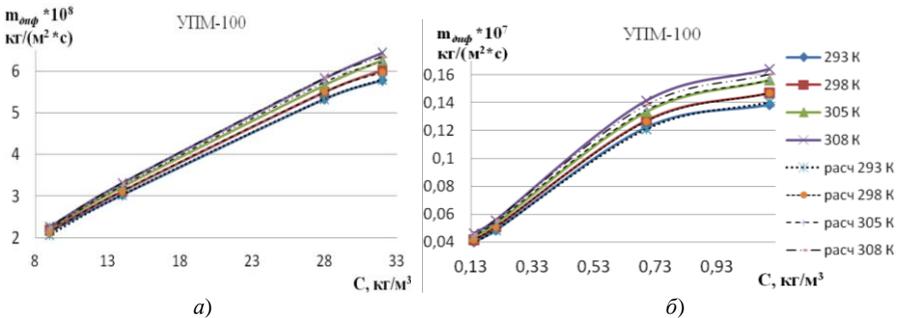


Рис. 5. Зависимости диффузионного потока ( $m_{диф}$ ,  $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ ) белка (а) и солей (б) от концентрации раствора ( $C$ ,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ) для ультрафильтрационных мембран УПИМ-100 при  $P = 1 \text{ МПа}$

По результатам исследований 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 коэффициента диффузионной проницаемости использовано выражение

$$P_d = A \exp(BC) \left( \frac{T}{T_0} \right)^m \quad (7)$$

## 2. Значения эмпирических коэффициентов для уравнения 7

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

Графики зависимостей коэффициента задержания белка и минеральных солей от давления и концентрации раствора представлены на рис. 6.

Из зависимостей видно, что ультрафильтрационный процесс обеспечивает достаточную степень концентрирования белков, однако необходима дополнительная обработка концентрата для извлечения избытка минеральных солей. С увеличением концентрации растворенных веществ возрастает значение приграничных диффузионных слоев и усиливается явление концентрационной поляризации.

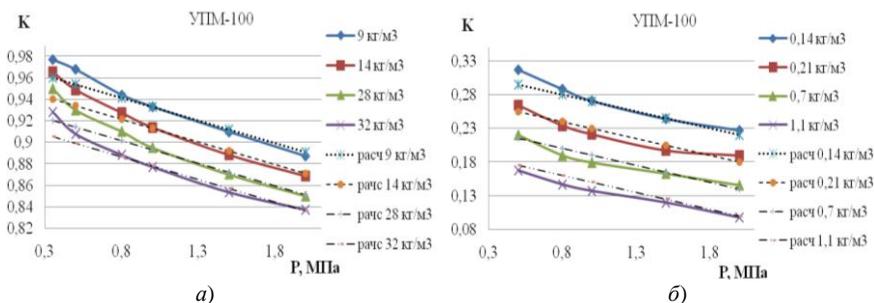


Рис. 6. Зависимости коэффициента задержания ( $K$ ) белка ( $a$ ) и солей ( $b$ ) от давления ( $P$ , МПа) при различных концентрациях белка для ультрафильтрационных мембран УПМ-100

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

$$K = 1 - \frac{1}{1 + \left( \frac{1}{k_p k_1} - 1 \right) \left[ 1 - \exp\left( -\frac{J k_p k_2}{D} \right) \right] \exp(-J k_3)}, \quad (8)$$

где  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  – эмпирические коэффициенты;  $k_p$  – коэффициент распределения мембран;  $D$  – коэффициент диффузии, м<sup>2</sup>/с.

### 3. Значения эмпирических коэффициентов для уравнения 8

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

Было предположено, что наложение электрического поля позволит снизить коэффициент задержания солей ультрафильтрационными мембранами. Для снижения негативных эффектов наложение электрического поля осуществлялось импульсами. По полученным данным, оптимально использование периода импульсов, равного 1 с, при плотностях тока до 100 А/м<sup>2</sup>.

Были получены экспериментальные зависимости коэффициента задержания мембранами минеральных солей от плотности тока и концентрации в растворе (рис. 7).

Согласно результатам экспериментальных исследований, наложение электрических импульсов с периодом 1 с увеличивает эффективность деминерализации концентрата в интервале плотности тока 70...100 А/м<sup>2</sup>.

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

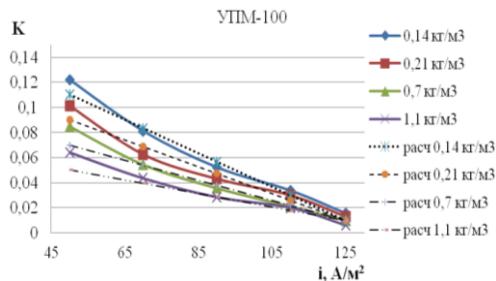


Рис. 7. Зависимости коэффициента задержания ( $K$ ) солей от плотности тока ( $i$ , А/м<sup>2</sup>) при  $P = 1,0$  МПа и различных концентрациях солей для ультрафильтрационных мембран УПМ-100

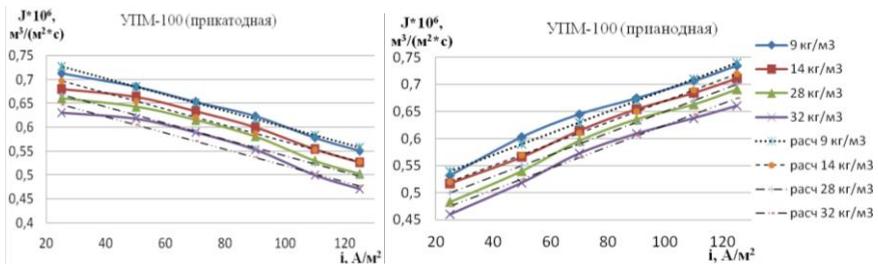
$$K = \frac{1}{1 + \left( \frac{1}{k_4 k_p} - 1 \right) \left[ 1 - \exp \left( - \frac{k_5 J k_p i \eta}{D k_p i \eta} \right) \right] \exp(-k_6 J)}, \quad (9)$$

где  $k_4, k_5, k_6$  – эмпирические коэффициенты;  $i$  – плотность тока,  $\text{А/м}^2$ ;  $\eta$  – выход по току;  $D$  – коэффициент диффузии,  $\text{м}^2/\text{с}$ .

#### 4. Значения эмпирических коэффициентов для уравнения 9

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

Производительность процесса оценивается величиной удельного потока растворителя через мембрану, в том числе с наложением электрических импульсов (рис. 8).



**Рис. 8. Зависимости удельного потока растворителя ( $J, \text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ ) от плотности тока ( $i, \text{А/м}^2$ ) при  $P = 1,0$  МПа и различных концентрациях белка для прикатодных и прианодных ультрафильтрационных мембран УПМ-100**

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

$$J = k(\Delta P - (B_i \exp(n_i C_{\text{исх}}) \exp(A_i / T) i \eta)), \quad (10)$$

где  $B_i, n_i, A_i$  – эмпирические коэффициенты.

#### 5. Значения эмпирических коэффициентов для уравнения 10 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

## 6. Значения эмпирических коэффициентов для уравнения 10 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

Отклонение всех расчетных данных от экспериментальных не превышает 10%.

**Четвертая глава** посвящена разработке математической модели массопереноса в ультрафильтрационных аппаратах. При разработке математической модели приняты следующие допущения: 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.

Для нахождения осмотического потока растворителя, аппроксимируя зависимости осмотического давления подсырной сыворотки от концентрации, получим выражение

$$v_{осм} = \alpha (1,0455 C_{рет} - 1,0455 C_{пер}), \quad (11)$$

где  $C_{рет}$  – средняя концентрация белка в ретентате, кг/м<sup>3</sup>;  $C_{пер}$  – средняя концентрация белка в пермеате, кг/м<sup>3</sup>.

На основе суммарного потока массы (рис. 9) и материального баланса по растворенному веществу получена замкнутая система уравнений (12) для определения изменения концентраций растворенного вещества в пермеате и ретентате с течением времени для каждой камеры ультрафильтрационного аппарата с учетом влияния электрических импульсов.



**Рис. 9. Схема основных потоков массопереноса при ультрафильтрации:**  
 $m_{диф}$  – диффузионный перенос вещества;  $m_{кон}$  – конвективный перенос вещества;  $v_{кон}$  – конвективный перенос растворителя;  $v_{осм}$  – осмотический перенос растворителя

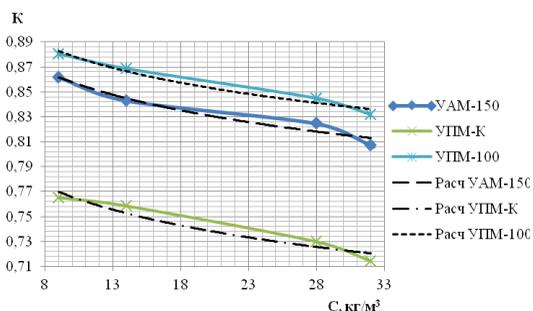
$$\left\{ \begin{array}{l} dC_j^{БВХ} / d\tau + dC_j^{БК} / d\tau = \varepsilon \left[ (V_1^{БК} - \sum_{j=1}^{n-1} N_j) - 2L \right] C_j^{БК} - \varepsilon \left[ (V_1^j - \sum_{j=1}^n N_j) + 2L \right] C_j^{БВХ}; \\ dC_j^{БК} / d\tau = z(\tau)(C_j^{БВХ} - C_j^{БК}); \\ C_{пер} = R_j (C_j^{БК} - C_j^{БВХ}); \\ C_{j-1}^{БВХ} = C_j^{БК}; \\ C_j^{БК}(0) = C_j^{БВХ}(0) = C_0, \end{array} \right. \quad (12)$$

где  $j = 1, 2, 3, \dots, n$ ;  $\sum_{j=1}^{n-1} N_j = 0$ ;  $N = 2\alpha_j F_M (\Delta P_j + 1,0455^{C_{\text{пет}}} - 1,0455^{C_{\text{пер}}})$ ;

$$\varepsilon = \frac{2}{F_M \chi}; \quad L = 0,5\alpha_j (1 - K_j) \Delta P F_M; \quad z(\tau) = \left( V_1^{\text{ВХ}} - \sum_{j=1}^n N_j \right) / \left( V_{E_0} - \tau \sum_{j=1}^n N_j \right);$$

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

На основе модели была разработана и зарегистрирована программа для ЭВМ, позволяющая определять концентрации и объемы пермеата и ретентата в промежуточных камерах и на выходе из аппарата с импульсным подводом тока (свидетельство № 2015614888).



**Рис. 10. Сравнение экспериментальных и расчетных данных по коэффициенту задержания белка**

Для своевременной регенерации и замены мембран предложен численный метод расчета периода работы ультрафильтрационной мембраны в среде подсырной сыворотки с учетом набухания. Мембрана рассмотрена как плоская полимерная пластина, закрепленная по периметру и уложенная на металлическую проволочную сетку-подложку, узлы которой воздействуют на ее поверхность при прогибе под воздействием рабочего давления  $P$ .

Зная контактные напряжения  $\sigma_k$ , можем найти продолжительность  $\tau$  работы мембраны

$$\tau = \frac{\pi h^2}{4D_d \xi} \left( 1 - \frac{\sigma_k}{\sigma_p} \right)^2, \quad (13)$$

где  $h$  – толщина мембраны с учетом подложки, м;  $D_d$  – коэффициент диффузии разделяемой среды в материал мембраны, м<sup>2</sup>/с;  $\xi$  – коэффициент линейной аппроксимации;  $\sigma_p$  – напряжение разрушения материала мембраны, МПа.

Расчетные значения эксплуатационного периода хорошо соотносятся с экспериментами, приведенными в работе<sup>1</sup>. На основе предложенного алгоритма разработана программа для ЭВМ (свидетельство о регистрации № 2014615341).

**Пятая глава** посвящена разработке технологического оформления и численного метода расчета ультрафильтрационного аппарата плоскокамерного типа с импульсным подводом тока, а также расчета величины нагрева концентрата.

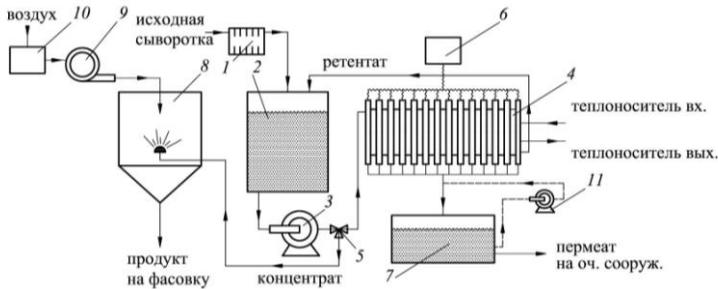
Зависимость мощности нагрева  $P$  от массового расхода раствора  $m/\tau$ , его удельной теплоемкости  $c$  и величины перепада температуры  $\Delta T$  позволяет определить разницу  $\Delta T$  между исходной температурой раствора и температурой раствора в момент времени  $\tau$ :

$$\Delta T = \frac{P\tau}{mc}. \quad (14)$$

На основании предложенного алгоритма расчета была разработана программа для ЭВМ (свидетельство № 2013618596).

Предложена схема линии концентрирования и деминерализации подсырной сыворотки для ООО «Бондарский сыродельный завод», включающая этапы центрифугирования исходной сыворотки, ее концентрирования и деминерализации, а также сушки полученного концентрата (рис. 11).

В схеме применяется плоскокамерный ультрафильтрационный аппарат (патент № 2532813 RU), принятый к разработке на ОАО «ТАГАТ» им. С. И. Лившица. 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.



**Рис. 11. Схема линии 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 – теплоventильатор;
- 10 – патронный фильтр; 11 – промывной насос

<sup>1</sup> Лазарев В. А. Разделение и концентрирование молочной сыворотки на ультрафильтрационных и обратноосмотических мембранах: дис. ... канд. техн. наук. М.: РХТУ, 2015. 119 с.

## 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 сни-

жает 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<sup>2</sup> 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.

## ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

$K$  – коэффициент задержания;  $C_{\text{пер}}$  – концентрация растворенных веществ в пермеате, кг/м<sup>3</sup>;  $C_{\text{исх}}$  – концентрация растворенных веществ в исходном растворе, кг/м<sup>3</sup>;  $F_m$  – площадь мембраны, м<sup>2</sup>;  $\tau$  – время проведения эксперимента, с;  $J$  – удельный поток растворителя, м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·с);  $k_p$  – коэффициент распределения;  $C_m$  – концентрация растворенных веществ в мембране, кг/м<sup>3</sup>;  $P_d$  – коэффициент диффузионной проницаемости, м<sup>2</sup>/с;  $\delta$  – толщина мембраны, м;  $T$  – температура, К;  $\Delta P$  – рабочее давление, МПа;  $D_d$  – коэффициент диффузии, м<sup>2</sup>/с;  $i$  – плотность тока, А/м<sup>2</sup>;  $\eta$  – выход по току;  $\Delta p$  – разность осмотических давлений, МПа;  $\alpha$  – гидродинамическая проницаемость, м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·с·Па);  $\sigma_k$  – контактное напряжение, МПа;  $V$  – объем пермеата, м<sup>3</sup>.

## ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

*Статьи в периодических изданиях, рекомендованных ВАК РФ:*

1. **Богомолов, В. Ю.** Промышленная переработка вторичного молочного сырья / В. Ю. Богомолов, С. И. Лазарев // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. – 2014. – № 1(50). – С. 82 – 91.

2. **Лазарев, С. И.** Мембранный метод концентрирования отходов на Бондарском сыродельном заводе / С. И. Лазарев, В. Ю. Богомолов, К. К. Полянский // Сыроделие и маслоделие. – 2014. – № 4. – С. 34 – 36.

3. **Богомолов, В. Ю.** Оценка продолжительности работы ультрафильтрационной мембраны при концентрировании подсырной сыворотки / В. Ю. Богомолов, В. И. Кочетов, С. И. Лазарев и др. // Вестник Российской академии сельскохозяйственных наук. – 2014. – № 4. – С. 69 – 71.

4. **Богомолов, В. Ю.** Расчет элементов мембранного агрегата для очистки промышленных растворов и стоков методом ультрафильтрации / В. Ю. Богомолов, В. И. Кочетов, С. И. Лазарев // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. – 2015. – № 2(56). – С. 195 – 202.

*Статьи в журналах, входящих в реферативную базу Scopus:*

5. **Kochetov, V. I.** Analysis of a combined type of membrane device for purification of industrial solutions by ultrafiltration / V. I. Kochetov, S. I. Lazarev, V. Yu. Bogomolov // *Chemical and Petroleum Engineering*. – 2015. – V. 50, № 11. – P. 700 – 706.

*Статьи и тезисы в материалах научных конференций:*

6. **Богомолов, В. Ю.** Особенности процесса мембранной переработки отходов сырных производств / В. Ю. Богомолов, С. И. Лазарев, С. А. Вязовов // *Perspektywiczne opracowania sa nauka i technikami* – 2013: materialy IX międzynarodowej naukowi-praktycznej konferencji. V. 30. Ekologia geografia i geologia. – Przemysl, 2013. – P. 26 – 29.

7. **Богомолов, В. Ю.** Расчет срока службы полимерной мембраны УАМ-150 при концентрировании подсырной сыворотки / 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.

8. **Богомолов, В. Ю.** Исследование основных характеристик процесса мембранного концентрирования вторичного молочного сырья / В. Ю. Богомолов, С. И. Лазарев // *Теоретические и практические аспекты сорбционных и мембранных процессов: материалы Междунар. конф.* – Кемерово, 2014. – С. 86–87.

9. **Богомолов, В. Ю.** Усовершенствование математической модели ультрафильтрационного концентрирования молочной сыворотки / В. Ю. Богомолов, С. И. Лазарев, С. А. Вязовов // *Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн: материалы II Междунар. науч.-практ. конф.* – Тамбов, 2015. – Вып. 2. – С. 92 – 94.

*Патент на изобретения и авторские свидетельства:*

10. **Пат. № 2532813 РФ**, МПК В01 D61/42, В01 D63/08. Электробаромембранный аппарат с плоскими фильтрующими элементами / 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.

11. **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 ; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВПО «ТГТУ». – № 2013616573 ; заявл. 23.07.2013 ; опубл. 12.09.2013.

12. **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 ; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВПО «ТГТУ». – № 2014613122 ; заявл. 09.04.2014 ; опубл. 26.05.2014.

13. **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 ; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВПО «ТГТУ». – № 2015611609 ; заявл. 11.03.2015 ; опубл. 29.04.2015.

---

Подписано в печать 26.01.2016.  
Формат 60 × 84/16. 0,93 усл. печ. л. Тираж 100 экз. Заказ № 566

Издательско-полиграфический центр ФГБОУ ВПО «ТГТУ»  
392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106, к. 14  
Тел./факс (4752) 63-81-08, 63-81-33. E-mail: izdatelstvo@admin.tstu.ru