

На правах рукописи



ОВСЯННИКОВ ВИТАЛИЙ ЮРЬЕВИЧ

**РАЗВИТИЕ СИСТЕМЫ ПРОЦЕССОВ КРИОСКОПИЧЕСКОГО
КОНЦЕНТРИРОВАНИЯ ЖИДКИХ ПИЩЕВЫХ И
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СРЕД ВЫМОРАЖИВАНИЕМ**

Специальность 05. 18. 12 – Процессы и аппараты пищевых
производств

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Воронеж – 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Воронежский государственный университет инженерных технологий» (ФГБОУ ВО «ВГУИТ»)

Научный консультант: заслуженный изобретатель РФ,
доктор технических наук, профессор
Антипов Сергей Тихонович
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный
университет инженерных технологий»

Официальные оппоненты: **Белозеров Георгий Автономович**
доктор технических наук, профессор, член - корреспондент РАН
Всероссийский научно-исследовательский институт холодильной промышленности – филиал ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В.М. Горбатова» РАН, директор
Бабакин Борис Сергеевич
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Московский государственный университет пищевых производств», профессор

Фатыхов Юрий Адгамович
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет, заведующий кафедрой
Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики», г. Санкт - Петербург

Защита диссертации состоится «12» декабря 2019 г. в 11 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 сайтах ВАК при Минобрнауки РФ <https://vak.minobrnauki.gov.ru> и ВГУИТ <https://www.vsuet.ru> «11» сентября 2019 г.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВО «ВГУИТ». Полный текст диссертации размещен в сети «Интернет» на официальном сайте ФГБОУ ВО «ВГУИТ» <https://www.vsuet.ru> «26» августа 2019 г.

Автореферат разослан «5» ноября 2019 г.

Ученый секретарь совета по защите диссертаций
на соискание ученой степени кандидата технических наук,
на соискание ученой степени доктора технических наук,
Д 212.035.01, д.т.н., профессор



Л.Н. Фролова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Согласно Государственной программе развития сельского хозяйства и регулирования рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия на 2013-2020 гг., утвержденной постановлением Правительства РФ от 14 июля 2012 г. № 717, агропромышленный комплекс является ведущим системообразующим сектором экономики страны, формирующим продовольственный рынок и экономическую безопасность. В рамках Государственной программы планируется достижение соответствующих величин по большинству основных индикаторов Доктрины продовольственной безопасности РФ.

Повышение темпов функционирования и повышения рентабельности мясной, молочной и консервной отраслей ставит новые задачи для переработки сырья и вторичных ресурсов при получении концентрированных продуктов с использованием передовых технологий и практик.

Процесс концентрирования жидких сред является важнейшей стадией технологического процесса производства концентрированных жидких сред, определяющий качественные характеристики и показатели теплоэнергетической эффективности функционирования технологического процесса.

Одним из перспективных направлений создания новых технических решений для концентрирования жидких сред, обеспечивающих получение качественного продукта с наиболее полным сохранением исходного химического состава, а также эффективного использования энергетических ресурсов является разработка и внедрение в промышленность высокоинтенсивных кристаллизаторов для криоскопического концентрирования вымораживанием.

Теоретические и практические основы процесса формирования структуры кристаллической фазы льда в процессе концентрирования пищевых сред и их аппаратурное оформление отражены в работах отечественных ученых: А.Г. Ткачева, Г.А. Носова, Н.В. Бучковой, О.Г. Комякова, В.А. Чепурненко, В.Т. Плотникова, В.Н. Филаткина, И.А. Короткого, и ряда зарубежных исследователей: О.Г. Бурдо, J.A. Burton, R. Harriot, K. Kawasaki, S. Okawa, W. Pelt, P. Pronk и др.

Работа проводилась в соответствии с планом НИР кафедры машин и аппаратов пищевых производств ВГУИТ на 2016 – 2019 гг. «Инновационное развитие техники пищевых технологий: машины, аппараты и биореакторы» № г.р. 01201253 ГРНТИ: 65.13.19; ФЦП № 14577.21.0256 от 26.09.2017 г. по тематике «Разработка функциональных пищевых продуктов для безглютенового и геродиетического питания, в том числе для профилактики остеопороза»; приоритетного направления развития НОЦ ВГУИТ «Энергоресурс» «Разработка энергосберегающих технологий и оборудования пищевой и химической промышленности»; Стратегической программы исследований технологической платформы «Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК –

продукты здорового питания» на 2014 – 2020 гг. «Разработка энергосберегающего оборудования пищевых и перерабатывающих производств АПК» в редакции № 1/18 от 16 мая 2018 г.

Цель и задачи диссертационной работы. Цель работы – развитие системы процессов получения концентрированных жидких сред вымораживанием, разработка оборудования, способов управления и рекомендаций по проектированию и внедрению в производство высокоэффективной техники, обеспечивающей достижение высоких показателей качества конечной продукции.

Для достижения цели решались следующие основные **задачи**:

1. Определение реологических, теплофизических, криоскопических свойств жидких сред, величины вымороженной влаги и характера поведения жидких сред при охлаждении.

2. Исследование основных кинетических закономерностей процесса концентрирования вымораживанием жидких сред в широком диапазоне изменения режимных параметров и комплексное сравнительное исследование свойств готовых концентратов.

3. Создание комплекса математических моделей, описывающих особенности поведения жидких сред при вымораживании влаги и характера формирования льда на теплообменных поверхностях различной конфигурации в условиях нестационарного массообмена.

4. Формулировка концептуальных подходов к созданию высокоэффективных способов и техники для концентрирования вымораживанием жидких сред.

5. Разработка высокоэффективных конструкций кристаллизаторов для концентрирования вымораживанием жидких сред и получения льда и способа вымораживания, позволяющих обеспечить интенсивный теплообмен между хладагентом и средой, а также инженерных методик их расчетов.

6. Предложение условий алгоритмического управления процессами концентрирования вымораживанием жидких сред в кристаллизаторах непрерывного и периодического действия.

7. Оценена стабильность, точность и устойчивость функционирования технологической системы концентрирования жидкой среды вымораживанием.

8. Выполнение эксергетического анализа и оценка теплоэнергетической эффективности процесса получения концентрированных жидких сред.

9. Осуществление промышленной апробации предложенных методик и разработанных конструкций оборудования для концентрирования жидких сред вымораживанием влаги с технико-экономическим обоснованием эффективности внедрения в производство.

Научная концепция работы. Развитие и научное обеспечение системы принципов и методов криоскопического концентрирования жидких сред вымораживанием влаги в кристаллизаторах с различными режимами работы и различным начальном содержании сухих веществ в средах, с соответствую-

ющим аппаратурным оформлением, на основе исследований и анализа закономерностей тепло – и массообмена в процессах кристаллизации льда.

Научные положения, выносимые на защиту:

- кинетические закономерности процесса криоскопического концентрирования вымораживанием лиофильных и лиофобных жидких пищевых и технологических сред и их использование при проектировании высокоэффективных установок для вымораживания жидкостей пищевого и фармакологического назначения;

- комплекс математических моделей и алгоритмов, формулирующих процессы тепло – и массообмена при льдообразовании в аппаратах непрерывного и периодического действия;

- обоснованные концептуальные подходы к созданию высокоэффективных способов и техники для концентрирования вымораживанием жидких пищевых и технологических сред, направленные на интенсификацию тепловых и массообменных процессов с соответствующим аппаратурным оформлением за счет моделирования и совершенствования конструкций кристаллизаторов;

- условия алгоритмического управления непрерывным и периодическим процессами концентрирования вымораживанием жидких сред;

- принципы и методы интенсификации при создании высокоэффективного оборудования с инженерными методиками расчета, обеспечивающих получение концентрированных жидкостей высокого качества.

Научная новизна. Разработаны концептуальные принципы создания высокоэффективных способов и оборудования для концентрирования вымораживанием жидких сред, направленные на повышение эффективности тепловых и массообменных процессов в системе жидкость - твердое тело с сопутствующим аппаратурным оформлением, достигнутым в результате моделирования и усовершенствования конструкций установок для концентрирования вымораживанием жидких сред.

Установлены основные кинетические закономерности процессов льдообразования в жидкостях при их концентрировании вымораживанием.

Методом дифференциально-термического анализа исследовано охлаждение жидких сред и определены термические эффекты превращения воды в лед, что позволило выявить температурный диапазон их холодильной обработки.

Созданы математические модели:

- процесса вымораживания влаги из лиофильных жидких сред на вращающейся цилиндрической поверхности, учитывающая особенности конвективной составляющей теплообмена при омывании жидкой средой криволинейной поверхности;

- процесса удаления жидкой фазы вращающейся цилиндрической поверхностью и характеризующего величину потерь растворимых веществ;

– процесса концентрирования вымораживанием лиофобной эмульсии - творожной сыворотки в шнековом кристаллизаторе, описывающего гидродинамическое поведение технологической среды в канале шнека, под воздействием градиента давления различной направленности и особенностей взаимодействия льда и жидкости;

– процесса кристаллизации льда при вымораживании льда на орбентной теплообменной поверхности, учитывающие переменный характер теплофизических свойств вымороженного льда от температуры;

– процесса тепло – и массообмена процесса вымораживания льда на плоской поверхности с учетом переохлаждения среды в зоне кристаллизации льда.

Установленные закономерности, позволяют рассчитать основные параметры функционирования кристаллизаторов для концентрирования жидкостей вымораживанием влаги в фиксированных условиях работы.

Доказана энергетическая целесообразность предлагаемых процессов производства концентрированных жидких сред вымораживанием на основании анализа эксергетических показателей.

Научная новизна разработанных технических решений подтверждается 9 патентами Российской Федерации на изобретения (пат. РФ № 2206839, 2220385, 2221202, 2228493, 2344722, 2569021, 2651279, 2668294, 2674456).

Практическая значимость работы. Комплекс теоретических и экспериментальных исследований, выполненных в условия лабораторий и промышленного производства, результаты математического моделирования, а также анализ работы техники для вымораживания жидкостей позволили разработать высокоэффективные способы получения концентрированных жидких сред вымораживанием (пат. РФ №2228493, 2221202, 2581874) с соответствующим аппаратным оформлением (пат. РФ № 2206839, 2220385, 2221202, 2228493, 2344722, 2569021, 2651279, 2668294, 2674456).

Определены и практически обоснованы режимы процессов концентрирования вымораживанием водных экстрактов поджелудочной железы, печени, желчи, крови крупного рогатого скота, творожной сыворотки, вишневого сока, обеспечивающие максимальное повышение кратности сгущения при сокращении длительности обработки, снижении удельных затрат энергии и повышение качества готовой продукции. Разработаны экспериментальные установки периодического и непрерывного действия, методики исследования процессов концентрирования вымораживанием.

Выполнено комплексное исследование показателей качества жидких сред, полученных в результате концентрирования вымораживанием.

Произведена оценка стабильности, точности и устойчивости функционирования технологической линии концентрирования творожной сыворотки вымораживанием и предложены условия улучшения ее работы.

Осуществлен эксергетический анализ систем концентрирования вы-

мораживанием, доказавший, что эксергетическая эффективность предлагаемых решений на 7...13 % выше, чем у существующих.

Разработаны методики инженерного расчета предлагаемых перспективных конструкций кристаллизаторов для концентрирования жидкостей вымораживанием влаги, функционирующих периодически и непрерывно.

С целью повышения эффективности процесса концентрирования жидких сред вымораживанием разработаны: способ непрерывного вымораживания и получения чешуйчатого льда с аккумулярованием теплоты хладагента (пат. РФ № 2228493), способ автоматического управления процессом вымораживания влаги в двухступенчатой вымораживающей установке (пат. РФ № 2221202), способ автоматического управления циклическим процессом концентрирования вымораживанием (пат. РФ № 2581874).

Разработаны оригинальные конструкции установок для концентрирования жидких сред вымораживанием влаги периодического и непрерывного действия (пат. РФ № 2206839, 2220385, 2221202, 2228493, 2344722, 2569021, 2651279, 2668294, 2674456).

Проданы лицензии (договоры №23/18 от 14.09.2018 г. № 39/18 от 29.10.2018 г.) на право использования интеллектуальной собственности предприятием ООО «ГлавМясПром» по патентам на изобретения №2651279 и №2668294.

Результаты диссертации используются в учебном процессе ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий» на старших курсах подготовки бакалавров и магистров в качестве материалов для курсового проектирования и выпускных квалификационных работ.

Методология и методы исследования. Методологическая основа исследования включает комплекс общенаучных (анализ, синтез, дедукция, проверка истинности теории путем обращения к практике и др.) и научных методов познания. Исследования проводили согласно методологии, в основу которой положен системный подход.

Соответствие темы диссертации паспорту научной специальности. Диссертационное исследование соответствует п. 1, 2, 3, 4 паспорта специальности 05.18.12 – «Процессы и аппараты пищевых производств».

Степень достоверности и апробация работы. Степень достоверности результатов проведенных исследований подтверждается глубокой проработкой литературных источников по теме диссертации, постановкой многочисленных экспериментов, применением современных инструментальных методов анализа, математической обработкой результатов экспериментов, публикацией основных положений диссертации.

Основные положения и результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на ежегодных международных, всероссийских, научных, научно-технических и научно-практических конференциях, форумах и симпозиумах: (Могилев, 2001 г.); (Тольятти, 2001 г.); (Москва, 2001 г.); (Воро-

неж, 2001-2018 г.); (Краснодар, 2002, 2015 г.); (Вологда, 2004 г.); (Санкт–Петербург, 2004 г.); (Казань, 2005, 2007 г.); (Барнаул, 2007 г.); (Санкт–Петербург, 2013, 2019 г.); (Прага, 2014-2016 г.); (Тула, 2014 г.); (София, 2015, 2017 г.); (Шеффилд, 2015-2017 г.); (Пшемысль, 2014-2017 г.); (Москва, 2016 г.); (Днепр, 2017, 2018 г.); (Кемерово, 2018 г.), и на отчетных научных конференциях ВГУИТ (Воронеж, 2001-2019 г.).

Результаты работы экспонировались на региональных, межрегиональных и всероссийских выставках «Продторг. Торговое оборудование» (Воронеж, 2000 г.); «Мясомолочная индустрия» (Воронеж, 2001 г.); «Продторг» (Воронеж, 2002 г.); «Продторг» (Воронеж, 2008 г.); «Пищевая индустрия» (Воронеж, 2012 г.) «Урожай» и «Пищевая индустрия» в рамках VI Воронежского Агропромышленного Форума (Воронеж, 2014 г.); «Международной выставке Изобретений и инноваций» (Воронеж 2016-2018 г.); на конкурсе инновационных проектов в рамках Воронежского Промышленного Форума (Воронеж, 2008 г.) по итогам которых работа оценена дипломами и медалями различного уровня.

Всего по теме диссертации опубликовано 192 работы, в том числе 1 учебник, 5 учебных пособий, 2 монографии, 3 статьи в изданиях, индексируемых в международных базах цитирования Scopus и Web of Science, 29 статей в журналах, рекомендованных ВАК РФ, получено 9 патентов РФ.

Структура и объем работы. Диссертация изложена в двух томах. Первый том состоит из введения, семи глав, основных выводов и результатов, списка литературы, включающей 305 наименований, в том числе 42 на иностранных языках. Основное содержание работы изложено на 362 страницах машинописного текста, содержит 259 рисунков и 20 таблиц. Второй том состоит из девяти приложений к диссертации объемом 148 страниц.

Личное участие автора в получении результатов, изложенных в диссертации, состоит в анализе литературных и патентных источников по проблеме диссертационного исследования, постановке и проведении экспериментальных исследований, в анализе и обобщении результатов и их математической обработке, подготовке работы к публикации. Автором разработана техническая документация, проведена работа по патентованию разработок, апробация и внедрению разработанных технологий в производство.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлена характеристика современного состояния технологии и техники концентрирования жидких сред вымораживанием, обоснована актуальность избранной темы диссертационной работы, оценен уровень разработанности темы исследований, научная новизна и практическая значимость выполненных исследований.

В первой главе систематизированы литературные данные о современном состоянии технологии и техники концентрирования жидких сред

вымораживанием. Рассмотрены особенности математического моделирования процессов кристаллизации при вымораживании, современные конструкции концентрирующих вымораживающих установок и направления инновационного развития теплообменных процессов при концентрировании жидкостей вымораживанием.

На основании проведенного обзора и анализа сформулированы цель и задачи диссертационной работы, представлена проблемно – концептуальная схема проведения исследований, раскрывающая последовательность этапов выполнения исследований, при реализации поставленных цели и задач работы; определены пути и методы решения научной проблемы.

Во второй главе выполнена системная оценка объектов исследования. Представлена системная характеристика экстрактов поджелудочной железы и печени (лиофильные эмульсии со свойствами зелей), желчи крупного рогатого скота (лиофильная эмульсия со свойствами гелей), творожной сыворотки (лиофобная эмульсия со свойствами гелей), вишневого сока (лиофобная суспензия) и пищевой крови (лиофобная эмульсия со свойствами зелей), как объектов концентрирования вымораживанием. Приводятся данные по реологическим, теплофизическим и криоскопическим свойствам.

Обсуждаются также результаты процесса кристаллизации влаги на основании метода термического анализа и интервалы температурных зон с характерным фазовым превращением и энергией связи влаги с материалом.

В третьей главе изложено описание барабанного кристаллизатора (рис. 1) и методики проведения экспериментальных исследований по вымораживанию влаги из экстрактов поджелудочной железы, печени и желчи.

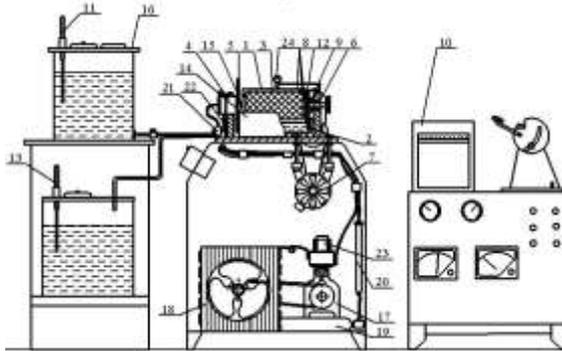


Рис. 1. Схема барабанного кристаллизатора:

- 1 - вымораживающий барабан; 2-поддон; 3-внутренняя обечайка; 4-сальник; 5-вал; 6-опоры;
- 7-электродвигатель; 8-термопары; 9-гокосъемник; 10-потенциометр; 11, 12, 13-термометры; 14-нож;
- 15-мерная линейка; 16-бачок; 17-компрессор; 18-конденсатор; 19-ресивер; 20-фильтр-осушитель;
- 21- терморегулирующий вентиль; 22-чувствительный патрон; 23-реле давления;
- 24-шкальный индикатор; 25, 26-манометры

Моделирование процесса вымораживания влаги на вращающейся, охлаждаемой цилиндрической поверхности базируется на одномерной нестационарной задаче теплообмена с соответствующими граничными и временными условиями:

$$\frac{\partial T_m(R; \tau)}{\partial \tau} = a_m \cdot \left(\frac{\partial^2 T_m(R; \tau)}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \cdot \frac{\partial T_m(R; \tau)}{\partial R} \right) \quad R_1 \leq R \leq R_1 + \delta \quad (1)$$

$$\frac{\partial T_{cm}(R; \tau)}{\partial \tau} = a_{cm} \cdot \left(\frac{\partial^2 T_{cm}(R; \tau)}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \cdot \frac{\partial T_{cm}(R; \tau)}{\partial R} \right) \quad R_0 \leq R \leq R_1 \quad (2)$$

граничные условия:

$$R=R_0 \quad \lambda_{cm} \cdot \frac{\partial T_{cm}(R; \tau)}{\partial R} = \alpha_c (T_c - T_{cm1}) \quad (3)$$

$$R=R_1 \quad \lambda_{cm} \cdot \frac{\partial T_{cm}(R; \tau)}{\partial R} = \lambda_m \cdot \frac{\partial T_m(R; \tau)}{\partial R} \quad (4)$$

$$R=R_1 + \delta \quad \lambda_m \cdot \frac{\partial T_m(R; \tau)}{\partial R} = q_{kp} \cdot \rho_m \cdot \frac{d\delta(\tau)}{d\tau} + \alpha_p (T_p - T_n) \quad (5)$$

$$\frac{d\delta(\tau)}{d\tau} = f(T_p - T_n) \quad (6)$$

временные условия:

$$\tau=0 \quad R_1 + \delta(\tau) < R < R_2 \quad T_p(R; 0) = T_p \quad (7)$$

$$R_0 < R < R_1 \quad T_{ct}(R; 0) = T_c \quad (8)$$

$$\tau > 0 \quad R > R_1 + \delta(\tau) \quad T_p(R; \tau) = T_p \quad (9)$$

$$R_0 < R \quad T_c(R; \tau) = T_c \quad (10)$$

В результате аналитического решения поставленной задачи были получены формулы, описывающие распределение температуры в вымороженной твердой фазе и в цилиндрической стенке барабана в безразмерных переменных:

$$t_m(r, \theta) = 1 + \sum_{k=1}^{\infty} \left(\frac{2 \cdot (t_n - 1)}{J_1^2(\mu_k)} \int_0^1 r \cdot J_0(\mu_k r) dr \right) \cdot \exp(-\beta_k \theta) \cdot J_0(\beta_k r) \quad (11)$$

$$t_{cm}(r_1, \theta_1) = 1 + \sum_{k=1}^{\infty} \left(\frac{2 \cdot (t_{n1} - 1)}{J_1^2(\mu_{k1})} \int_0^1 r_1 \cdot J_0(\mu_{k1} r_1) dr_1 \right) \cdot \exp(-\beta_{k1} \theta_1) \cdot J_0(\beta_{k1} r_1) \quad (12)$$

Величина безразмерного времени вымораживания слоя льда заданной толщины рассчитывалась по рекуррентной формуле, с учетом зависимости распределения температуры в слое вымороженной твердой фазы. Полученная формула позволяет при любом начальном значении безразмерного вре-

мени и достаточно малом значении шага по относительной толщине льда определить величину безразмерного времени вымораживания слоя льда заданной толщины:

$$\theta_i = \theta_{i-1} - \Delta\omega \cdot (\gamma + \varepsilon \cdot (t_p - t_n)) \cdot (Bi_{op} \cdot (t_p - t_n) + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{2 \cdot \beta_k \cdot (t_n - 1) \exp(-\beta_k \theta)}{J_1^2(\mu_k)} \times \\ \times J_1(\beta_k \cdot (\omega + 1)) \int_0^1 (\omega + 1) \cdot J_0(\mu_k \cdot (\omega + 1)) d(\omega + 1))^{-1} \quad (13)$$

Сравнение экспериментальных данных с результатами математического решения показали, что средняя относительная ошибка и среднее квадратичное отклонение составили не более 10 %, что позволило сделать вывод об адекватности математической модели (1)–(13).

В основу модели удаления пленки жидкости вращающейся цилиндрической поверхностью были положены уравнения, учитывающие напряжение, возникающее в пленке под воздействием вязкости и силы тяжести:

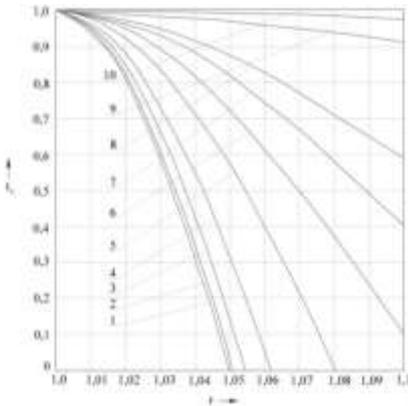


Рис. 2. Зависимость относительной температуры льда от относительного радиуса r при относительной криоскопической температуре 1,088 и безразмерном времени θ :
1 – 0,005; 2 – 0,01; 3 – 0,025; 4 – 0,050;
5 – 0,10; 6 – 0,150; 7 – 0,20; 8 – 0,250;
9 – 0,50; 10 – 1,0

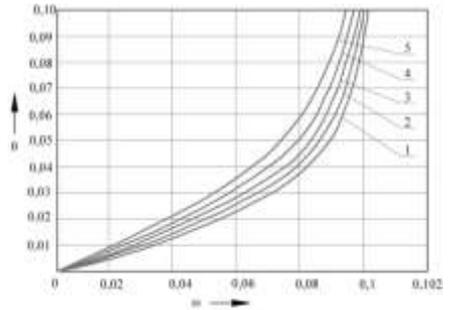


Рис. 3. Зависимость безразмерного времени вымораживания слоя льда от относительной толщины при значениях критерия Био Bi_{op} 0,1 и относительной криоскопической температуре:
1 – 1,088; 2 – 1,084; 3 – 1,080; 4 – 1,074;
5 – 1,070.

$$\tau = \tau_0 + \frac{dU(y)}{dy} \quad (14)$$

$$\tau = (h - y) \cdot \rho_p \cdot g \cdot \sin \varphi, \quad (15)$$

с граничным условием на цилиндрической поверхности:

$$\text{при } y=0 \quad U(0)=W, \quad (16)$$

Результат совместного решения уравнений был записан в виде уравнения распределения скоростей поперек пленки:

$$U(y) = W - \frac{\tau_0}{\mu} \cdot y - \frac{g \cdot \rho_p \cdot \sin \varphi}{\mu} \left(h \cdot y - \frac{y^2}{2} \right) \quad (17)$$

Полагалось, что наружный слой пленки движется как квазитвердое тело, а между ним и поверхностью барабана находится область вязкопластичного течения. Величина объемной подачи жидкости (18), перемещаемой барабаном (взятая на единицу его длины) получена из уравнения профиля скорости поперек пленки. Полученные зависимости скоростей движения квазитвердого слоя и области вязкопластичного течения позволили получить уравнение толщин пленки увлекаемой жидкости и области вязкопластичного течения (19, 20).

$$V_c = W \cdot \delta_1 - \frac{\tau_0 \cdot \delta_1^2}{2 \cdot \mu} - \frac{\rho_p \cdot g \cdot \sin \varphi}{\mu} \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot h \cdot \delta_1^2 - \frac{1}{6} \cdot \delta_1^3 \right) + U_0 \cdot \Delta \quad (18)$$

$$\Delta = h - \delta_1 = \frac{\tau_0}{\rho_p \cdot g \cdot \sin \varphi} \quad (19)$$

$$\delta_1 = \frac{2 \cdot \tau_0 - \sqrt{4 \cdot \tau_0^2 + 2 \cdot \mu \cdot W \cdot \rho_p \cdot g \cdot \sin \varphi_0}}{\rho_p \cdot g \cdot \sin \varphi_0} \quad (20)$$

Выполнены исследования, отражающие изменение толщины слоя льда, вымороженного из экстрактов поджелудочной железы, печени и желчи крупного рогатого скота на поверхности вращающегося барабана (рис. 4-12).

Установлено, что с увеличением средней температуры стенки барабана толщина вымороженного слоя льда монотонно убывает. При достижении температуры стенки барабана равной криоскопической температуры жидкости, намораживание влаги прекращается. Повышение начального содержания сухих веществ вызывает уменьшение толщины слоя вымороженного льда. Зависимость между толщиной вымороженного слоя льда и углом погружения барабана вымораживающей установки в исследуемые жидкости в диапазоне 0,35...1,05 рад носит линейный характер, с увеличением угла погружения в продукт барабана толщина вымороженного слоя льда увеличивается.

Повышение содержания сухих веществ в исходном продукте уменьшает толщину вымороженного слоя льда при незначительном изменении угла наклона кривых к оси абсцисс при концентрировании экстракта печени и заметном уменьшении угла наклона у экстракта поджелудочной железы и желчи.

Анализ графиков толщины вымороженного слоя льда от частоты вращения барабана показал, что зависимость количества льда, намороженного на цилиндрической поверхности нелинейная и увеличивается с уменьшением частоты вращения барабана.

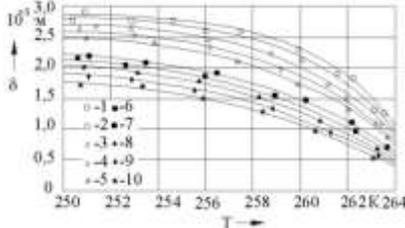
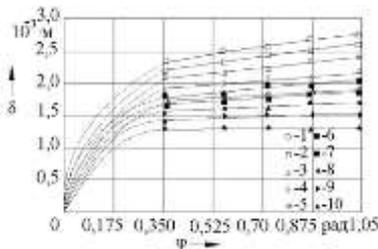


Рис. 2. Изменение толщины слоя льда δ , м, вымороженного из экстракта поджелудочной железы от средней температуры стенки барабана T , К, содержания сухих веществ в начальном экстракте СВ, % и скорости вращения барабана n , с^{-1} , погруженном в продукт на угол $0,873$ рад.:

СВ=7,5 %; 1- $n=0,066$; 2- $n=0,092$;
3- $n=0,110$; 4- $n=0,140$; 5- $n=0,166$;
СВ=16,2 %; 6- $n=0,066$; 7- $n=0,092$;
8- $n=0,110$; 9- $n=0,140$; 10- $n=0,166$



Аналогичные кривые, полученные при увеличенном начальном содержании сухих веществ, позволяют отметить заметное снижение толщины льда при концентрировании исследуемых продуктов. При этом видно значительное уменьшение толщины вымороженного льда при вымораживании влаги из экстракта печени при переходе от 12,70 % к 18,40 % в среднем на 0,62 мм.

Исследование зависимостей содержания сухих веществ в сконцентрированной жидкости показало, что наибольшее влияние на величину конечного содержания сухих веществ оказывает начальное содержание сухих веществ и средняя температура стенки барабана. Повышение частоты вращения барабана способствует снижению конечного содержания сухих ве-

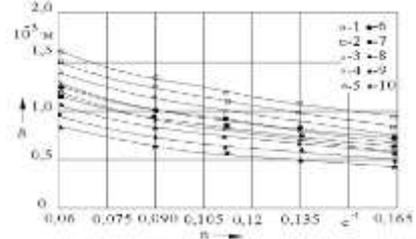


Рис. 3. Изменение толщины слоя льда δ , м, вымороженного из экстракта поджелудочной железы от скорости вращения барабана n , с^{-1} , содержания сухих веществ в экстракте СВ, (%) и средней температуры стенки барабана T , К при погружении барабана на угол $0,61$ рад.:

СВ=7,5 %; 1- $T=251$; 2- $T=254$;
3- $T=257$; 4- $T=260$; 5- $T=263$;
СВ=16,2 %; 6- $T=251$; 7- $T=254$;
8- $T=257$; 9- $T=260$; 10- $T=263$

Рис. 4. Изменение толщины слоя льда δ , м, вымороженного из экстракта поджелудочной железы от угла погружения барабана в экстракт φ , рад, содержания сухих веществ в экстракте СВ, (%) и средней температуры стенки барабана T , К при скорости вращения барабана $0,11$ с^{-1} :

СВ=7,5 %; 1- $T=251$; 2- $T=254$; 3- $T=257$;
4- $T=260$; 5- $T=263$;
СВ=16,2 %; 6- $T=251$; 7- $T=254$; 8- $T=257$;
9- $T=260$; 10- $T=263$

ществ в сконцентрированной жидкости.

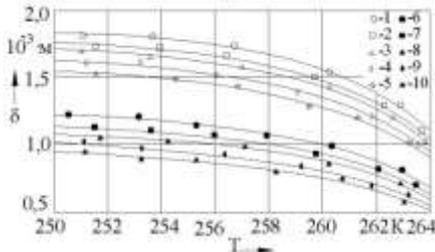


Рис. 5. Изменение толщины слоя льда δ , м, вымороженного из экстракта печени от средней температуры стенки барабана T , К, содержания сухих веществ в начальном экстракте СВ, % и скорости вращения барабана n , с^{-1} погруженном на угол $0,61$ рад.:
СВ=12,7 %; 1- $n=0,066$; 2- $n=0,092$; 3- $n=0,110$;
4- $n=0,140$; 5- $n=0,166$;
СВ=18,4 %; 6- $n=0,066$; 7- $n=0,092$; 8- $n=0,110$;
9- $n=0,140$; 10- $n=0,166$

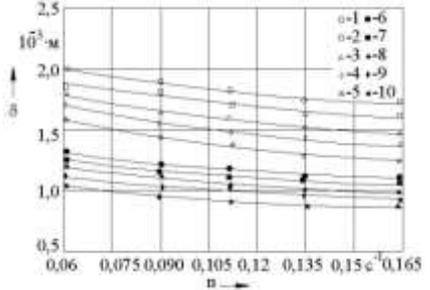
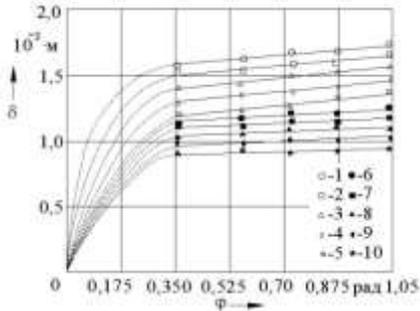


Рис. 6. Изменение толщины слоя льда δ , м, вымороженного из экстракта печени от скорости вращения барабана n , с^{-1} , содержания сухих веществ в экстракте СВ, % и средней температуры стенки барабана T , К при погружении на угол $0,733$ рад.:
СВ=12,7 %; 1- $T=251$; 2- $T=254$; 3- $T=258$;
4- $T=260$; 5- $T=263$;
СВ=18,4 %; 6- $T=251$; 7- $T=254$; 8- $T=257$;
9- $T=260$; 10- $T=264$

Рис. 7. Изменение толщины слоя льда δ , м, вымороженного из экстракта печени от угла погружения барабана в экстракт φ , рад., содержания сухих веществ в экстракте СВ, % и средней температуры стенки барабана T , К при скорости вращения барабана $0,092$ с^{-1} :
СВ=12,7 %; 1- $T=251$; 2- $T=254$;
3- $T=257$; 4- $T=260$; 5- $T=263$;
СВ=18,4 %; 6- $T=251$; 7- $T=254$;
8- $T=257$; 9- $T=260$; 10- $T=263$

Исследованы удельные затраты энергии на вымораживание льда. Для всех исследуемых жидкостей при повышении температуры стенки барабана вызывает нелинейное увеличение величины удельных затрат энергии. Увеличение начального содержания сухих веществ в концентрируемой жидкости также способствует повышению удельных затрат энергии. С увеличением угла погружения барабана кристаллизатора в концентрируемую жидкость величина удельных затрат энергии монотонно нелинейно снижается.

Экспериментальные данные по кинетике затвердевания влаги на вращающейся охлаждаемой поверхности обрабатывали методами теории

подобия, что позволило получить обобщенные критериальные уравнения.

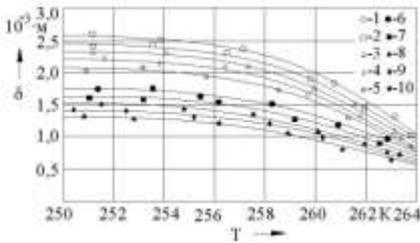


Рис. 8. Изменение толщины слоя льда δ , м, вымороженного из желчи от средней температуры стенки барабана T , К, содержания сухих веществ в начальной желчи СВ, (%) и скорости вращения барабана n , с^{-1} , при погружении на угол $0,733$ рад.:
СВ = 8,8 %; 1- $n=0,066$; 2- $n=0,092$; 3- $n=0,110$;
4- $n=0,140$; 5- $n=0,166$;
СВ = 17,1 %; 6- $n=0,066$; 7- $n=0,092$; 8- $n=0,110$;
9- $n=0,140$; 10- $n=0,166$

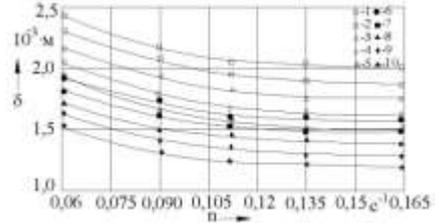
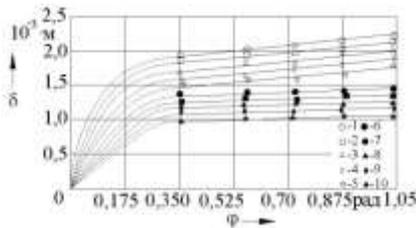


Рис. 9. Изменение толщины слоя льда δ , м, вымороженного из желчи от скорости вращения барабана n , с^{-1} , содержания сухих веществ в желчи СВ, (%) и средней температуры стенки барабана T , К при погружении на угол $0,61$ рад.:

СВ = 8,8 %; 1- $T=251$; 2- $T=254$; 3- $T=257$;
4- $T=260$; 5- $T=263$;
СВ = 17,1 %; 6- $T=251$; 7- $T=254$; 8- $T=257$;
9- $T=260$; 10- $T=263$

Рис. 10. Изменение толщины слоя льда δ , м, вымороженного из желчи от угла погружения барабана в экстракт φ , рад, содержания сухих веществ в желчи СВ, % и средней температуры стенки барабана T , К при скорости вращения барабана $0,11 \text{ с}^{-1}$:

СВ = 8,8 %; 1- $T=251$; 2- $T=254$; 3- $T=257$;
4- $T=260$; 5- $T=263$;
СВ = 17,1 %; 6- $T=251$; 7- $T=254$; 8- $T=257$;
9- $T=260$; 10- $T=263$

Комплексная оценка органолептических и физико-химических показателей экстрактов, сконцентрированных вымораживанием и вакуум-выпариванием показал, что концентрирование вымораживанием влаги, обеспечивает сохранение качества водных экстрактов при концентрировании за счет сохранения белковых соединений, жировых веществ и аминокислот.

Активность экстракта поджелудочной железы, сконцентрированного вымораживанием, выше, чем в жидкости, полученной вакуум-выпариванием. В экстракте печени, полученном вакуум-выпариванием снижено общее содержание белков, жиров и повышена кислотность по сравнению с концентратом, полученном вымораживанием.

В четвертой главе представлено описание шнекового кристаллизатора (рис. 11) и методики проведения экспериментальных исследований по вымораживанию влаги из творожной сыворотки.

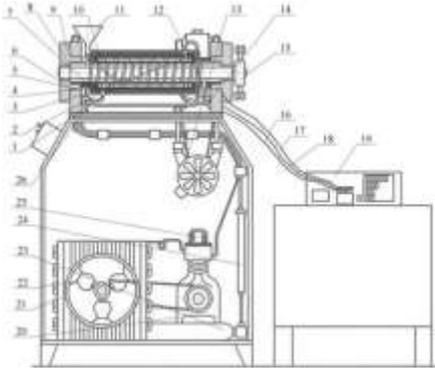


Рис. 11. Шнековый кристаллизатор:
 1 – корпус; 2 – рубашка теплообменная;
 3, 4 – патрубки подачи и отвода хладагента; 5 – навивка стальная;
 6 – опора; 7 – изоляция; 8 – втулка подшипника; 9 – крышка; 10 – шнек;
 11 – устройство подачи жидкости; 12 – отводной патрубок; 13 – электродвигатель привода шнека; 14 – редуктор;
 15 – цепная передача;
 16, 17, 18 – термомпары; 19 – вторичный прибор ТРМ138; 20 – компрессор;
 21 – конденсатор; 22 – электродвигатель холодильного агрегата; 23 – ресивер;
 24 – фильтр-осушитель; 25 – реле давления; 26 – TRV



Рис. 12. Схема развертки шнекового канала

В ходе математического моделирования движения творожной сыворотки в шнековом канале кристаллизатора рассматривали его прямоугольную развертку (рис. 12) и решали задачу движения жидкости, базируясь на уравнении Навье-Стокса (21),

дополненное соответствующими граничными условиями (22-24):

$$-\frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) = 0, \quad (21)$$

$$x = \pm b, \quad -h \leq y < h, \quad w = w_c \quad (22)$$

$$y = -h, \quad -b \leq x \leq b, \quad w = w_c \quad (23)$$

$$y = h, \quad -b < x < b, \quad w = 0, \quad (24)$$

в результате чего получено:

$$w(x, y) = \frac{16\chi^2}{\pi^3} \cdot \frac{h^2}{\mu} \left(-\frac{\partial P}{\partial z} \right) \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(2n+1)^3} \left[1 - \frac{ch\left(\frac{2n+1}{2} \cdot \frac{\pi y}{\chi h}\right)}{ch\left(\frac{2n+1}{2} \cdot \frac{\pi}{\chi}\right)} \right] \cos\left(\frac{2n+1}{2} \cdot \frac{\pi x}{\chi h}\right) + \\ + w_c \left[1 - \frac{4}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(2n+1)} \cdot \frac{\cos\left[(2n+1) \cdot \frac{\pi x}{2b}\right] \cdot sh\left[(2n+1) \cdot \frac{\pi(y+h)}{2b}\right]}{sh\left[(2n+1) \cdot \frac{\pi}{\chi}\right]} \right]. \quad (25)$$

$$V = \frac{\chi h^4}{4\mu} \left(-\frac{\partial P}{\partial z} \right) \cdot \left[\frac{16}{3} - \frac{1024}{\pi^5 \chi} \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^3} \operatorname{th} \frac{(2n+1)\chi}{2} \right] +$$

$$+ w_c \left[4bh - \frac{32b^2}{\pi^3} \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^3} \cdot \frac{ch \frac{(2n+1)\pi}{2} - 1}{\operatorname{sh} \frac{(2n+1)\pi}{2}} \right], \quad (26)$$

где P - давление, Па; μ - динамическая вязкость жидкости, Па·с; w - проекция вектора скорости жидкости в направлении оси z , м/с; w_c - средняя скорость перемещения поверхностей шнека, образующих прямоугольный канал, м/с; $\chi = b/h$.

Поскольку шнековый канал имеет форму винтовой линии, то на жидкость в канале действуют также центробежные силы, которые вызывают поперечные циркуляции, что приводит к увеличению гидравлического сопротивления канала, который находится как:

$$\frac{\xi'}{\xi} = \frac{0,108K^{1/2}}{1 - 3,253K^{-1/2}}, \quad (27)$$

где $K = \operatorname{Re} \sqrt{\frac{d_{\text{эк}}}{D}}$, ξ' , ξ - гидравлические коэффициенты трения в винтовом и прямолинейном каналах; $d_{\text{эк}} \approx 4h$ эквивалентный диаметр канала, м.

При моделировании теплообмена условно делили шнековый канал на две зоны: в зоне снижения температуры без выделения льда осуществляется снижение температуры жидкости от начальной t_0 до криоскопической t_k (средней по сечению канала), где лед отсутствует. В зоне снижения температуры с выделением льда температура жидкости неизменна по длине канала и равна криоскопической t_k .

В винтовом канале возникают вторичные течения, повышающие коэффициент теплоотдачи. Поэтому критерий Нуссельта находили как:

$$\frac{Nu}{Nu_{np}} = \frac{0,1979K^{1/2}}{\chi \left[1 + F(\chi) \cdot K^{1/2} \right]}, \quad (28)$$

где χ - отношение толщин теплового и гидродинамического пограничных слоев.

$$\chi = \frac{2}{11} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{77}{4} \cdot \frac{1}{\operatorname{Pr}^2}} \right), \quad (29)$$

Поток теплоты в зоне снижения температуры без образования льда определяется по формуле:

$$Q_1 = cG(t_0 - t_k), \quad (30)$$

где c - теплоемкость жидкости, Дж/(кг·К).

Средний температурный напор в зоне снижения температуры без образования льда:

$$\text{Средний температурный напор в зоне с образованием льда:} \quad \Delta t_2 = t_k - t_x, \quad (31)$$

где t_x - температура хладагента, К.

Тепловой поток в зоне с образованием льда:

$$Q_2 = k_2 \cdot \Delta t_2 \cdot F_2. \quad (32)$$

Количество вымороженного льда:

$$G_{\text{л}} = \frac{Q_2}{r}, \quad (33)$$

где r - теплота кристаллизации жидкости, Дж/кг.

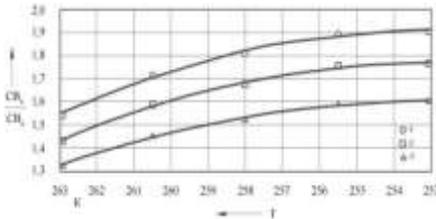


Рис. 13. Изменение степени концентрирования CB_w/CB_n , от температуры стенки испарителя T , К, при скорости движения шнека $n=0,12 \text{ c}^{-1}$ и содержании сухих веществ в исходной жидкости CB_n , %: 1— $CB_n=6,3$ %; 2— $CB_n=11,3$ %; 3— $CB_n=16,3$ %.

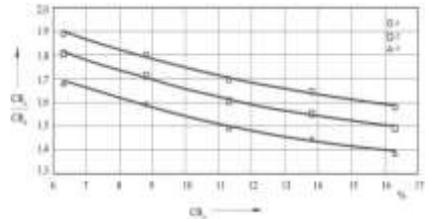


Рис. 14. Изменение степени концентрирования CB_w/CB_n , от содержания сухих веществ в исходной жидкости CB_n , % при температуре стенки испарителя $T=258 \text{ K}$ и скорости движения шнека n , c^{-1} : 1 — $n=0,06 \text{ c}^{-1}$; 2 — $n=0,12 \text{ c}^{-1}$; 3 — $n=0,18 \text{ c}^{-1}$.

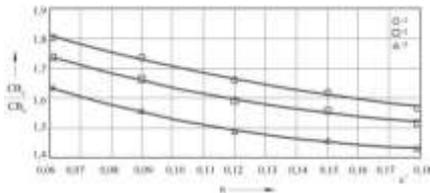


Рис. 15. Изменение степени концентрирования CB_w/CB_n , от скорости движения шнека n , c^{-1} , при температуре стенки испарителя $T=258 \text{ K}$, содержании сухих веществ в исходной жидкости $CB_n=11,3$ % и шаге шнека, м: 1— $s=12 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; 2— $s=18 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; 3— $s=24 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

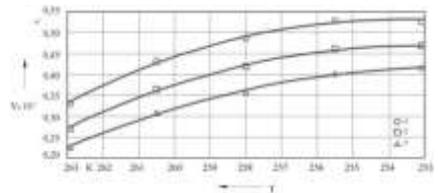


Рис. 16. Изменение объема льда $V_{\text{л}}$, M^3 , от температуры стенки испарителя T , К, при скорости движения шнека $n=0,12 \text{ c}^{-1}$ и содержании сухих веществ в исходной жидкости CB_n , %: 1— $CB_n=6,3$ %; 2— $CB_n=11,3$ %; 3— $CB_n=16,3$ %.

Выполнено исследование концентрирования вымораживанием творожной сыворотки в шнековом кристаллизаторе. Установлено, что степень концентрирования и количество вымороженного льда, монотонно убывает с

увеличением температуры стенки испарителя.

Повышение содержания сухих веществ в исходной жидкости приводит к менее выраженному характеру увеличения содержания сухих веществ в концентрате. Уменьшается и степень концентрирования.

Повышение температуры стенки испарителя вызывает уменьшение содержания сухих веществ в сконцентрированной жидкости. Содержание сухих веществ в концентрате снижается при увеличении скорости движения шнека при постоянных величинах содержания сухих веществ в исходной жидкости и температуры стенки испарителя. С увеличением температуры стенки испарителя значение содержания сухих веществ в растворе, полученном при расплавлении вымороженного льда, уменьшается. Увеличение шага шнека повышает содержание сухих веществ в растворе расплавленного льда.

Изменение удельных затрат энергии при вымораживании нелинейно возрастает при снижении температуры кипения хладагента в теплообменной рубашке. С повышением скорости движения шнека затраты энергии снижаются.

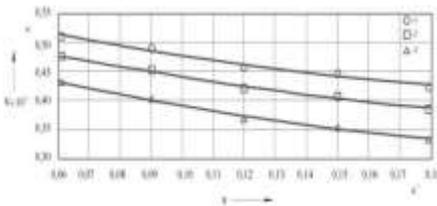


Рис. 17. Изменение объема льда $V_{\text{л}}$, м^3 от скорости движения шнека n , с^{-1} , при содержании сухих веществ в исходной жидкости $\text{СВ}_{\text{н}}=6,3\%$ и температуре стенки испарителя T , К: 1— $T=253\text{ К}$; 2— $T=258\text{ К}$; 3— $T=263\text{ К}$.

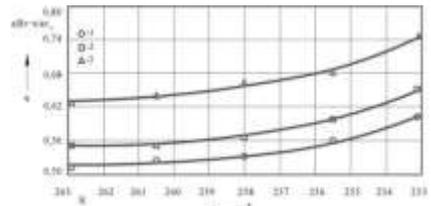


Рис. 18. Зависимость удельных затрат энергии q , $\text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{кг}$, от температуры стенки испарителя T , К, при скорости движения шнека $n=0,12\text{ с}^{-1}$ и содержания сухих веществ в исходной жидкости $\text{СВ}_{\text{н}}$, %: 1— $\text{СВ}_{\text{н}}=6,3\%$; 2— $\text{СВ}_{\text{н}}=11,3\%$; 3— $\text{СВ}_{\text{н}}=16,3\%$.

Затраты энергии на концентрирование повышаются при повышении содержания сухих веществ в исходной сыворотке, что объясняется необходимостью создания дополнительного переохлаждения сыворотки из-за снижающейся теплоемкости и уменьшающейся криоскопической температуры.

Проведен комплексный анализ характеристик творожной сыворотки и продуктов ее концентрирования, показавший, что концентрирование методом вымораживания влаги обеспечивает более полное сохранение аминокислот и веществ исходной сыворотки по сравнению с вакуумным выпариванием.

В пятой главе описан кристаллизатор с оребренными теплообменными элементами (рис. 19) и методика проведения исследований по вымораживанию влаги из вишневого сока на поверхности теплообменных элементов.

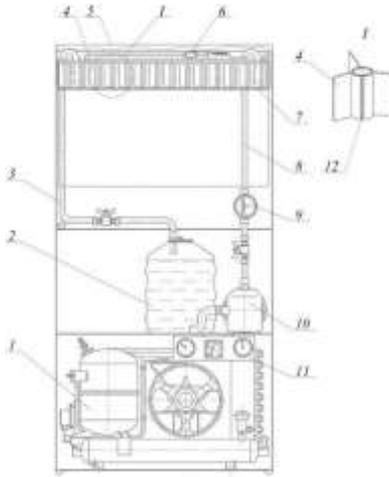


Рис.19. Схема кристаллизатора с оребренными теплообменными элементами:
 1 – холодильный агрегат; 2 – расходная емкость для продукта; 3 – магистраль отвода жидкости; 4 – оребренный теплообменный элемент; 5 – крышка установки; 6 – терморегулирующий вентиль; 7 – опрокидывающаяся ванна; 8 – магистраль подачи продукта; 9 – счетчик–расходомер; 10 – насос; 11 – приборная панель; 12 – палец испытателя

При математическом моделировании процесса вымораживания влаги на оребренной поверхности основывались на рассмотрении продольного ребра прямоугольного профиля (рис. 20).

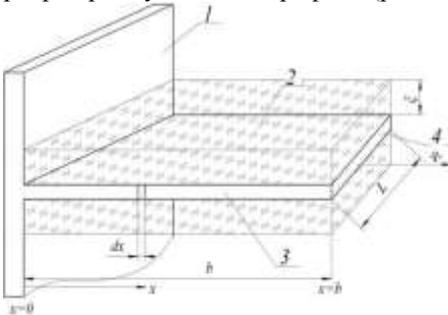


Рис. 20. Обозначения и система координат для анализа продольного ребра прямоугольного профиля с учетом теплоотдачи с торца: 1 – основная поверхность; 2 – боковая поверхность; 3 – концевая поверхность; 4 – торец ребра; L – длина ребра; b – высота ребра; ζ – слой вымороженного льда

Дифференциальное уравнение и общее решение:

$$\frac{d^2\theta}{dx^2} - m^2\theta = 0, \quad (35)$$

$$\theta = C_1 e^{mx} + C_2 e^{-mx}, \quad (36)$$

где θ – температурный напор; C_1, C_2 – произвольные постоянные; m – обобщенная функция профиля ребра, $m = (2\alpha/\lambda\delta_0)^{1/2}$; α – коэффициент теплоотдачи; λ – коэффициент теплопроводности; δ_0 – толщина ребра.

С учетом теплового потока через торец ребра граничные условия:

$$\text{при } x = b \quad \frac{d\theta}{dx} = -\frac{\alpha_e}{\lambda} \theta_e, \quad (37)$$

где α_e - коэффициент теплоотдачи на торце ребра; θ_e - температурный напор на торце ребра;

$$\text{при } x = 0 \quad \theta = \theta_e. \quad (38)$$

Решение, когда тепловой поток через торец ребра отсутствует:

$$\theta = \frac{\theta_0 \cdot ch(m(b-x))}{ch(mb)}, \quad (39)$$

где θ_0 - температурный напор идеально проводящего ребра.

Температурный напор в произвольном сечении в процентах от температурного напора в основании ребра $100\theta/\theta_0$ показан на рис. 21 как функция x и α . Расчет выполнен для медного ребра длиной 50 мм и толщиной 1,5 мм.

Значение m получено при коэффициенте теплоотдачи на боковых поверхностях ребра, равном 143 Вт/(м²·°C).

Смоделирован процесс при кристаллизации льда на оребренной поверхности в случае переменных значений теплофизических характеристик льда.

Предполагалась зависимость λ и c от T , в виде:

$$\lambda = \lambda_0 + \gamma T; \quad c = c_0 + \psi T, \quad (40)$$

где λ_0 , c_0 , γ , ψ - постоянные величины.

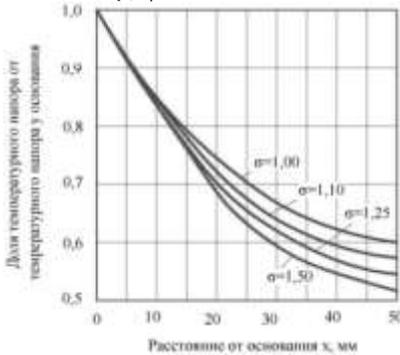


Рис. 21. Распределение температуры в продольном ребре прямоугольного профиля толщиной 1,5 мм и длиной 50 мм, показывающее влияние тепловых потерь с торца

Считали, что переохлаждение жидкой фазы отсутствует и температура в твердой фазе зависит только от координаты x и времени τ . Уравнение, описывающее изменение температуры в кристалле:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[(\lambda_0 + \psi T) \frac{\partial T}{\partial x} \right] = \rho (c_0 + \psi T) \frac{\partial T}{\partial \tau}, \quad (41)$$

где ρ - удельный вес вымороженного льда, кг/м³.

Начальные и граничные условия:

- на начальный момент

$$T(x, 0) = T_k \text{ при } x > 0, \quad (42)$$

где T_k - температура на фронте кри-

сталлизации;

- на фронте кристаллизации

$$T[\xi(\tau), \tau] = T_k. \quad (43)$$

Из условия теплового баланса на границе жидкой и твердой фаз:

$$\frac{d\xi}{d\tau} = \frac{\alpha_k}{Q_k} \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=\xi(\tau)}, \quad (44)$$

$$\alpha_\kappa = \frac{(\lambda_0 + \gamma T_\kappa)}{Q_0}, \quad Q_\kappa = \frac{Q_0}{(c_0 + \psi T_\kappa)}, \quad (45)$$

где α_κ - коэффициент теплоотдачи на фронте кристаллизации; Q_κ - количество теплоты, выделяющееся при кристаллизации; Q_0 - количество теплоты, выделяющееся в начальный момент времени.

На поверхности $x = 0$ считали температуру постоянной и равной T_0 , т.е.

$$T(0, \tau) = T_0. \quad (46)$$

Для вывода решения вводили величины:

$$\bar{\lambda} = \lambda_0 + \gamma \frac{T_\kappa + T_0}{2}; \quad \bar{c} = c_0 + \psi \frac{T_\kappa + T_0}{2}; \quad \theta = \frac{2}{T_\kappa - T_0} \left(T - \frac{T_\kappa + T_0}{2} \right); \quad (47)$$

$$\bar{\alpha} = \frac{\bar{\lambda}}{\rho c}; \quad b_1 = \frac{\gamma(T_\kappa - T_0)}{2\bar{\lambda}}; \quad b_2 = \frac{\psi(T_\kappa - T_0)}{2\bar{c}}; \quad q = \frac{2Q_0}{c(T_\kappa - T_0)}. \quad (48)$$

Искали переменные в виде:

$$\theta(x, \tau) = \theta(u); \quad u = x / \sqrt{2\alpha\tau}; \quad \xi(\tau) = \beta\sqrt{2\alpha\tau}, \quad (49)$$

где β - неизвестная постоянная.

Решение получено в виде ряда:

$$\theta(u) = \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{d^n \theta}{du^n} \right)_{u=\beta} \frac{(u-\beta)^n}{n!}. \quad (50)$$

При этом

$$\theta(\beta) = 1; \quad \left(\frac{d\theta}{du} \right)_{u=\beta} = \frac{q\beta}{1+b_1}. \quad (51)$$

Постоянная β определяется из трансцендентного уравнения:

$$\begin{aligned} \frac{2}{q}(1+b_1) &= \beta^2 + \beta^4 \left[\frac{1+b_2}{3(1+b_1)} + \frac{b_1}{3(1+b_2)^2} q \right] + \\ &+ \beta^6 \left[\frac{(1+b_2)^2}{15(1+b_1)^2} + \frac{5b_1+4b_1b_2-b_2}{12(1+b_1)^3} q + \frac{b_1^2}{2(1+b_1)^4} q^2 \right] + \\ &+ \beta^8 \left[\frac{(1+b_2)^3}{105(1+b_1)^3} + \frac{(1+b_1)(31b_1+22b_1b_2-9b_2)}{180(1+b_1)^4} q + \right. \\ &\left. + \frac{b_1(19b_1+15b_1b_2-4b_2)}{30(1+b_1)^5} q^2 + \frac{5b_1^3}{8(1+b_1)^6} q^3 + \dots \right]. \end{aligned} \quad (52)$$

Зная β , найдена скорость перемещения фронта фазового превращения при последовательной кристаллизации:

$$v = \frac{d\xi}{dt} = \frac{\beta\sqrt{\alpha}}{\sqrt{2\tau}}. \quad (53)$$

На рис. 22 представлен характер изменения толщины слоя льда, вы-

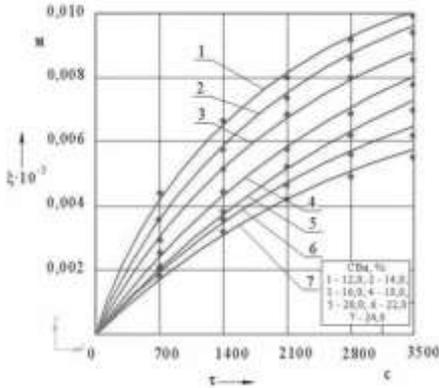


Рис. 22. Изменение толщины слоя льда вымороженного на оребренном теплообменном элементе при температуре стенки ребра 253 К и различных значениях начального содержания сухих веществ в вишневом соке

мороженного на оребренном теплообменном элементе при температуре стенки ребра 253 К и различных значениях начального содержания сухих веществ в исходном соке, при этом предполагалось неизменность коэффициентов теплоотдачи со стороны кипящего хладагента и продукта.

Проведены исследования роста и скорости роста ледяной фазы на теплообменных элементах площадью поверхности $0,08 \text{ м}^2$, за 3600 с в зависимости от температуры теплообменной поверхности и начального содержания сухих веществ в вишневом соке (рис. 23).

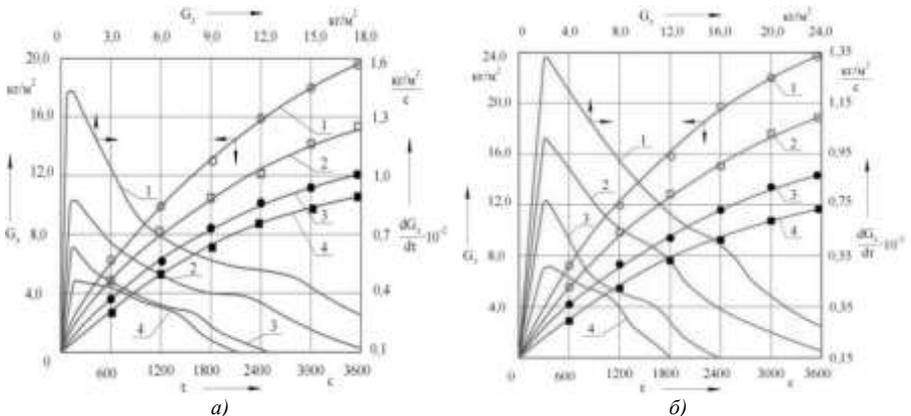


Рис. 23. Кривые роста и скорости роста ледяной фазы на поверхности теплообменных элементов площадью поверхности $0,08 \text{ м}^2$, при начальном содержании сухих веществ в вишневом соке, %: 1 – 12,0; 2 – 16,0; 3 – 20; 4 – 24 и температуре кипения хладагента, К: а - 258; б - 253

Начальное содержание сухих веществ в вишневом соке при постоянной температуре кипения хладагента в испарителе вымораживающей уста-

новки нелинейно снижает удельное количество льда, образовавшееся на теплообменной поверхности.

При увеличении начального содержания сухих веществ в вишневом соке величина отношения сухих веществ в сконцентрированном соке по отношению к исходному нелинейно монотонно снижается. Увеличение температуры кипения хладагента обуславливает пропорциональное снижение степени концентрирования.

Исследовано влияние условий вымораживания вишневого сока в циклическом режиме на характер получения концентрированного продукта (рис. 24-27). С уменьшением температуры кипения хладагента в испарителе установки величина удельного количества вымороженного льда монотонно увеличивается по зависимости близкой к линейной, вследствие перехода значительного количества свободной воды в твердую фазу из-за высоких значений температурного напора между циркулирующим соком и теплообменной поверхностью. С увеличением содержания сухих веществ в исходном соке удельное количество вымороженного льда монотонно снижается.

Величина удельных затрат энергии нелинейно увеличивается с понижением температуры кипения хладагента в испарителе вымораживающей установки, вызванным закономерным повышением энергопотребления используемым холодильным агрегатом, обеспечивающим достижение требуемого режима охлаждения.

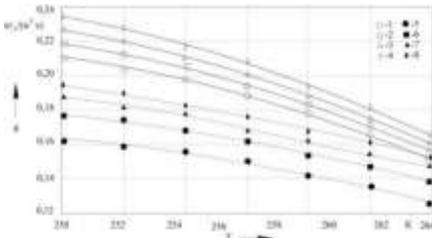


Рис. 24. Изменение удельного количества вымороженного льда $g_{\text{л}}$, кг_л/(м³·с), от температуры кипения хладагента T_0 , К, содержания сухих веществ в начальном соке СВ_н, % и удельной площади поверхности теплообменных элементов f , м²/м³ при расходе сока $Q=2 \cdot 10^{-5}$ м³/с:

СВ_н=14,2 %; 1- $f=56,6$ м²/м³; 2- $f=74,2$ м²/м³;
 3- $f=91,8$ м²/м³; 4- $f=109,4$ м²/м³;
 СВ_н=21,4 %; 5- $f=56,6$ м²/м³; 6- $f=74,2$ м²/м³;
 7- $f=91,8$ м²/м³; 8- $f=109,4$ м²/м³.

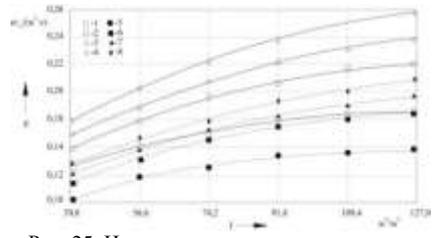


Рис. 25. Изменение удельного количества вымороженного льда $g_{\text{л}}$, кг_л/(м³·с), от удельной площади поверхности теплообменных элементов f , м²/м³, содержания сухих веществ в начальном соке СВ_н, % и расходе сока Q , м³/с при температуре кипения хладагента $T_0=257$, К:

СВ_н=14,2 %; 1- $Q=0$; 2- $Q=1,6 \cdot 10^{-5}$ м³/с;
 3- $Q=2,4 \cdot 10^{-5}$ м³/с; 4- $Q=4 \cdot 10^{-5}$ м³/с;
 СВ_н=21,4 %; 5- $Q=0$; 6- $Q=1,6 \cdot 10^{-5}$ м³/с;
 7- $Q=2,4 \cdot 10^{-5}$ м³/с; 8- $Q=4 \cdot 10^{-5}$ м³/с.

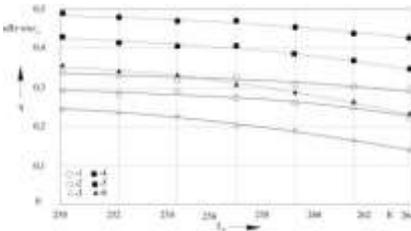


Рис. 26. Зависимость удельных затрат энергии q , кВт·ч/кг, при вымораживании вишневого сока от температуры кипения хладагента T_0 , К, расхода сока Q , м³/с, начального содержания сухих веществ CB_n , %, при удельной площади поверхности теплообменных элементов $f=127,0$ м²/м³:

$Q=0,8 \cdot 10^{-5}$ м³/с; 1 – $CB_n=23,4$ %;
 2 – $CB_n=18,0$ %; 3 – $CB_n=14,2$ %;
 $Q=2,4 \cdot 10^{-5}$ м³/с; 4 – $CB_n=23,4$ %;
 5 – $CB_n=18,0$ %; 6 – $CB_n=14,2$ %.

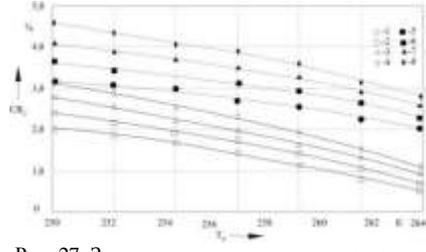


Рис. 27. Зависимость изменения содержания сухих веществ в растворе, полученном при расправлении вымороженного льда CB_n , %, от температуры кипения хладагента T_0 , К, содержания сухих веществ в начальном соке CB_n , % и удельной площади поверхности теплообменных элементов f , м²/м³ при расходе сока $Q=2 \cdot 10^{-5}$ м³/с:

$CB_n=14,2$ %; 1- $f=56,6$ м²/м³; 2- $f=74,2$ м²/м³;
 3- $f=91,8$ м²/м³; 4- $f=109,4$ м²/м³;
 $CB_n=21,4$ %; 5- $f=56,6$ м²/м³; 6- $f=74,2$ м²/м³;
 7- $f=91,8$ м²/м³; 8- $f=109,4$ м²/м³.

При увеличении удельной площади поверхности теплообменных элементов удельные затраты энергии прямо пропорционально повышаются, достигая максимальной величины при максимальной удельной площади поверхности теплообменных элементов равной $f=127$ м²/м³. Наибольшие затраты энергии требуются на вымораживание сока с начальным содержанием сухих веществ 12,0 %.

Снижение температуры кипения хладагента обуславливает монотонное нелинейное увеличение содержания сухих веществ, отводимых с вымороженным льдом. Вымораживая вишневый сок при температуре кипения хладагента более 258 К наблюдалось минимальное содержание сухих веществ в растворе, полученном при расправлении вымороженного льда.

Анализ антиоксидантной активности, органолептических и физико-химических показателей соков, сконцентрированных различными методами, показал, что концентрирование методом вымораживания оказывает минимальное влияние на вкусовые и ароматические вещества сконцентрированной жидкости, более полно сохраняются сахара и органические кислоты.

В шестой главе представлено описание устройства и принципа действия кристаллизатора с падающей пленкой жидкости для концентрирования вымораживанием пищевой крови (рис. 28).

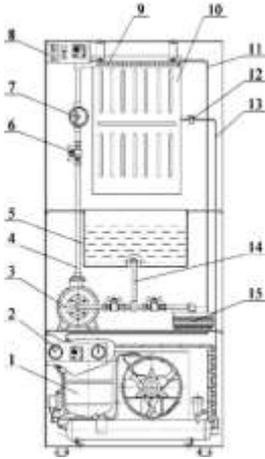


Рис. 28. Схема кристаллизатора с падающей пленкой жидкости:

1 – агрегат холодильный; 2 – панель холодильного агрегата; 3 – насос центробежный; 4 – магистраль напорная; 5 – бак напорный; 6 – вентиль напорной магистрали; 7 – счетчик жидкостный; 8 – панель управления; 9 – коллектор – ороситель; 10 – испаритель-вымораживатель; 11 – трубопровод отвода паров хладагента; 12 – вентиль терморегулирующий; 13 – трубопровод подачи жидкого хладагента; 14 – магистраль всасывающая; 15 – емкость сборная сконцентрированного продукта

При математическом моделировании процесса тепло- и массообмена при вымораживании влаги на плоской поверхности с учетом переохлаждения слоя льда полагалось, что граница раздела слоя льда и жидкой крови является определенным тепловым сопротивлением, поэтому на ней температура меняется скачком от температуры равновесия фаз T_k до некоторого переменного значения $T_\phi(\tau)$ (рис. 29).

Использовали кинетическое уравнение кристаллизации льда:

$$\frac{dy}{d\tau} = K [T_k - T_\phi(\tau)], \quad (54)$$

$$T_\phi(\tau) = T_k - \frac{1}{K} \frac{dy}{d\tau} = \varphi(\tau), \quad (55)$$

где K – кинетический коэффициент, характеризующий скорость обмена молекулами между твердой и жидкой фазами, м/(с·К).

Поток теплоты от фронта кристаллизации равен потоку теплоты от жидкой к твердой фазе плюс выделившаяся теплота кристаллизации:

$$g(\tau) = \left(\frac{dT}{dx}\right)_{x=y(\tau)} = \frac{q}{a} \frac{dy}{d\tau} + \frac{\alpha}{\lambda} (T_k - T_\phi), \quad (56)$$

где q – удельная теплота кристаллизации, Дж/кг; α – коэффициент теплоотдачи от жидкой фазы к кристаллической, Вт/(м²·К); λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К). Из

(53)-(55) получено:

$$g(\tau) = \left(\frac{q}{a} + \frac{\alpha}{aK}\right) \frac{dy}{d\tau} = \omega \frac{dy}{d\tau}, \quad (57)$$

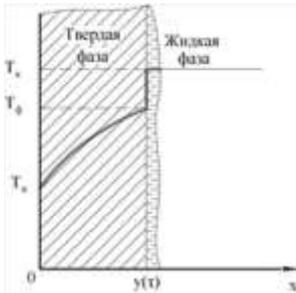


Рис. 29. Физическая модель роста твердой фазы в условиях направленного теплоотвода с учетом переохлаждения на границе раздела фаз

где

$$\omega = \frac{q}{a} + \frac{\alpha}{aK}. \quad (58)$$

Уравнение температуры твердой фазы:

$$T(x, \tau) = T_K - \frac{1}{K} \frac{dy}{d\tau} - \frac{1}{K} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{a^{n+1}} \frac{d^n}{dt^n} \left[\frac{[y(t)-x]^{2n+2}}{(2n+2)!} \frac{d^2 y}{dt^2} \right] - \omega \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{a^n} \frac{d^n}{dt^n} \left[\frac{[y(t)-x]^{2n+1}}{(2n+1)!} \frac{dy}{dt} \right], \quad (59)$$

Вводили безразмерные величины θ , ζ , t , z и после преобразований:

$$\theta(\xi, t) = \theta_K - (1 + \lambda_0) \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{(2k+2)!} \frac{d^{k+1}}{dt^{k+1}} [(z - \xi)^{2k+2}] - \lambda_0 \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{(2k)!} \frac{d^{k-1}}{dt^{k-1}} \left[\frac{d^2 z}{dt^2} (z - 1)^{2k} \right], \quad (60)$$

где $\lambda_0 = \alpha a / (\lambda q \cdot K)$.

Из условия $T(0, \tau) = T_{\Pi} = \text{const}$ следует:

$$(1 + \lambda_0) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{(2k)!} \frac{d^k}{dt^k} + \lambda_0 \left[\frac{dz}{dt} + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{(2k)!} \frac{d^{k-1}}{dt^{k-1}} \left(\frac{d^2 z}{dt^2} z^{2k} \right) \right] = \theta_K - \theta_{\Pi} = A. \quad (61)$$

Асимптотическое поведение безразмерной толщины твердой фазы z при больших значениях безразмерного времени t : получено в виде:

$$(1 + \lambda_0) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\beta_0^{2k} k!}{(2k)!} + \lambda_0 \left[\frac{\beta_0}{2\sqrt{t}} + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{-(\frac{1}{4})\beta_0^{2k+1}}{(2k)!} \frac{d^{k-1}}{dt^{k-1}} \left(t^{k-\frac{3}{2}} \right) \right] = \frac{T_K - T_{\Pi}}{q} = A. \quad (62)$$

После преобразований получено:

$$(1 + \lambda_0) \sqrt{\pi} x e^{x^2} \int_0^x e^{-\tau^2} d\tau + \frac{\lambda_0}{\sqrt{t}} B(x) = A, \quad (63)$$

$$B(x) = x e^{x^2} - 2x^2 F(x). \quad (64)$$

Принимая значение безразмерного времени $t \rightarrow 0$:

$$(1 + \lambda_0) \sqrt{\pi} x e^{x^2} \operatorname{erf} x = A. \quad (65)$$

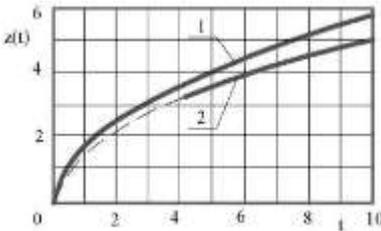


Рис. 30. Изменение безразмерной толщины слоя льда при влиянии переохлаждения на границе раздела фаз на кинетику роста при $\lambda_0 = 0$; $z = 1,8\sqrt{t}$ (кривая 1) и $\lambda_0 = 0,5$; $z = 1,6\sqrt{t}$ (кривая 2).

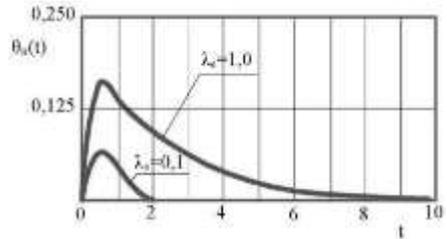


Рис. 31. Изменение безразмерной температуры внешней поверхности вымороженного льда ($x=0$) при $\theta_0 = \theta_M$; $A = 1,5$.

Кривая $z(\tau)$, построенная с использованием выражения (64), лежит ниже соответствующей кривой (1), вычисленной на основании решения классической задачи Стефана (рис. 30). Расхождение этих кривых может быть выражено

величиной относительного изменения коэффициента затвердевания $\delta\beta_0/\beta_0$:

$$\frac{\delta\beta_0}{\beta_0} = \frac{1}{2x^2 \left(\frac{1+\lambda_0}{\Lambda} + 1 \right)} \frac{\delta\lambda_0}{\lambda_0}, \quad (66)$$

При больших x величина $\delta\beta_0/\beta_0$ уменьшается. Поэтому наличие переохлаждения может быть обнаружено при изучении кинетики последовательной кристаллизации, в случае если Λ мало, т.е. $T_k - T_n \ll q$.

При $B(x) \neq 0$ выражение $z \approx \beta_0 \sqrt{t}$ можно рассматривать как точное решение задачи о скорости последовательного роста ледяной фазы в условиях направленного теплоотвода, если температура поверхности слоя льда меняется по закону:

$$\theta_n(t) = \theta_0 + \lambda_0 \frac{B(x)}{\sqrt{t}}, \quad (67)$$

При $t > 0$ выделение скрытой теплоты превращения и тепловой поток из раствора обуславливают некоторое увеличение $\theta_n(t)$ во времени (рис. 31). Для установления влияния переохлаждения на тепловую сторону роста кристаллов льда важную роль оказывает величина кинетического коэффициента K , который связывает скорость роста льда и переохлаждение крови.

Проведенные исследования вымораживания льда на неподвижной теплообменной поверхности испарителя площадью $0,2 \text{ м}^2$, за 3600 с в зависимости от температуры поверхности теплообмена и начального содержания сухих веществ в крови КРС при постоянном расходе продукта, омывающим теплообменную поверхность равном $0,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ представлены на рис. 32, 33.

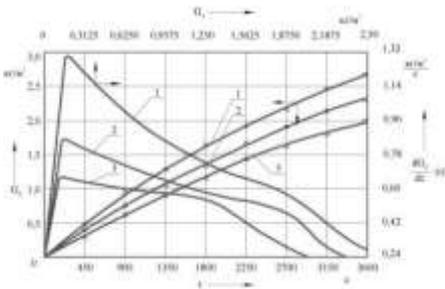


Рис. 32. Кривые роста и скорости роста льда на поверхности испарителя, при температуре кипения хладагента 260 К и начальном содержании сухих веществ в крови, %:
1 – 19,1; 2 – 23,2; 3 – 27,8.

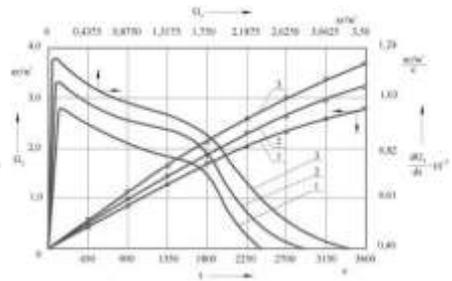


Рис. 33. Кривые роста и скорости роста льда на поверхности испарителя, при содержании сухих веществ в крови $19,1 \%$ при температуре кипения хладагента в испарителе, К :
1 – 258; 2 – 255; 3 – 253.

Повышение начального содержания сухих веществ в пищевой крови при постоянной температуре кипения хладагента в испарителе вызывает нелинейное уменьшение удельного количества льда, вымороженного на нем. При по-

нижении температуры кипения хладагента в испарителе кристаллизатора удельное количество льда, вымороженное из крови, повышается.

Исследован процесс циклического концентрирования крови (рис. 34-37). С уменьшением средней температуры стенки испарителя величина удельного количества вымороженного льда монотонно нелинейно повышается. Повышение начального содержания сухих растворимых веществ в исходной крови, поступающей на концентрирование с 18,0 до 28,0 % вызывает нелинейное снижение удельного количества вымороженного льда с 1 м² площади поверхности теплообмена.

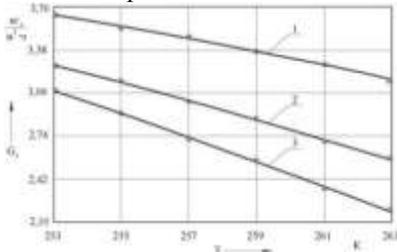


Рис. 34. Изменение удельного количества вымороженного льда с единицы площади поверхности испарителя кристаллизатора $G_{\text{л}}$, кг/(м²·ч) от температуры кипения хладагента в испарителе T_0 , К и начального содержания сухих веществ СВ_н, % при расходе крови $Q=0,23 \cdot 10^{-3}$ м³/с: 1 – 19,1%; 2 – 23,2 %; 3 – 27,8 %.

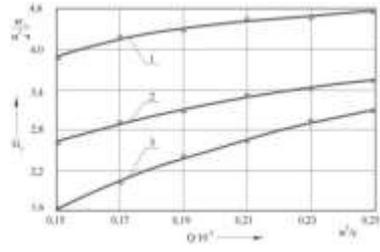


Рис. 35. Изменение удельного количества вымороженного льда с единицы площади поверхности испарителя кристаллизатора $G_{\text{л}}$, кг/(м²·ч) от расхода крови $Q \cdot 10^{-3}$, м³/с, и начального содержания сухих веществ СВ_н, % при температуре кипения хладагента в испарителе $T_0 = 255$ К: 1 – 19,1%; 2 – 23,2 %; 3 – 27,8 %.

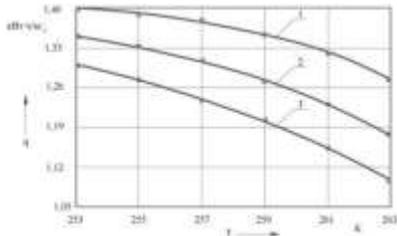


Рис. 36. Зависимость удельных затрат энергии при вымораживании крови КРС от температуры кипения хладагента в испарителе T_0 , К и содержания сухих веществ СВ_н, % при расходе крови $Q=0,23 \cdot 10^{-3}$ м³/с: 1 - СВ_н = 37,1 %; 2 - СВ_н = 26,4 %; 3 - СВ_н = 19,0 %.

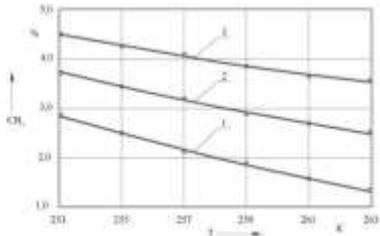


Рис. 37. Зависимость содержания сухих веществ в растворе, полученном при расправлении вымороженного льда СВ_р, % от температуры кипения хладагента в испарителе T_0 , и начального содержания сухих веществ СВ_н, % при расходе крови $Q=0,23 \cdot 10^{-3}$ м³/с: 1 – 19,1%; 2 – 23,2 %; 3 – 27,8 %.

Величина удельных затрат энергии закономерно нелинейно увеличи-

вается с понижением температуры кипения хладагента в испарителе установки и монотонно увеличивается с повышением расхода крови, омывающей испаритель. Повышение расхода крови вызывает снижение содержания сухих веществ в растворе, полученном при расплавлении вымороженного льда из-за интенсификации смывания более концентрированных слоев жидкости с поверхности формирования льда раствором с более низкой начальной концентрацией.

Снижение температуры кипения хладагента в испарителе увеличивается содержания сухих веществ в растворе, полученном при расплавлении вымороженного льда, что может быть объяснено несоответствием взаимных скоростей миграции молекул воды и растворенных веществ крови.

Сравнительная комплексная оценка качества показала, что концентрирование вымораживанием не приводит к разрушению ацетальных соединений, видоизменению глобул билирубина и конформным трансформациям молекул гемоглобина, а также частичному распаду жирных кислот, что характерно для выпаривания.

В седьмой главе представлены концептуальные подходы к созданию высокоэффективных способов и техники для концентрирования вымораживанием жидких сред, конструкции высокоэффективных кристаллизаторов для концентрирования жидкостей вымораживанием, способы управления и концентрирования жидкостей с аккумулярованием теплоты хладагента.

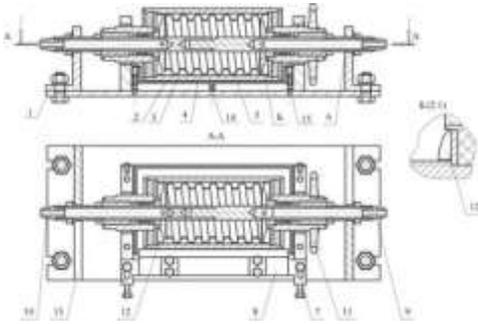


Рис. 38. Установка для вымораживания и получения чешуйчатого льда: 1-основание; 2-ванна; 3-поверхность вымораживания; 4-поверхность испарения; 5- барабан выгнетительный; 6-ось; 7- узел сальниковый; 8-устройство для удаления льда; 9-штуцер ввода хладагента; 10-штуцер отвода хладагента; 11-привод; 12-устройство для перемешивания; 13- устройство для перемещения оси; 14, 15, 16-устройства для регулировки положения ванны; 17-лоток.

Разработанные конструкции установок для вымораживания и получения льда позволяет интенсифицировать процесс теплообмена, увеличить производительность, повысить надежность работы, снизить потери хладагента.

Разработаны способы автоматического управления циклическим процессом вымораживания влаги и непрерывным двухступенчатым вымораживанием влаги из жидких сред, обеспечивающие эффективный контроль и регулирование основных параметров процесса концентрирования.

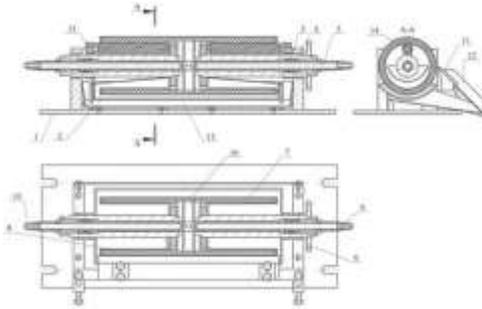


Рис. 38. Установка для вымораживания и получения чешуйчатого льда:
1- основание; 2-ванна для жидкости;
3- опоры вертикальные; 4- узлы сальниковые; 5 - ось; 6- устройство приводное; 7, 8 - поверхности испарения и вымораживания; 9 - устройство ввода хладагента; 10 - устройство вывода хладагента; 11, 14 – устройства удаления льда; 12-лоток; 13-желоб;
15- механизм приводной; 16- вставка разделительная

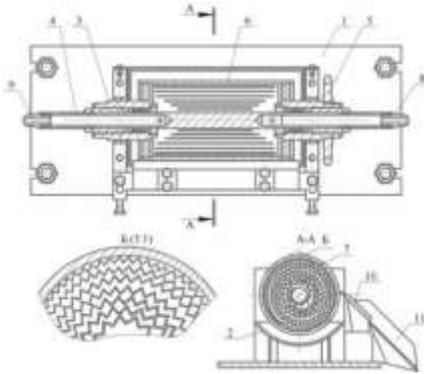


Рис. 39. Установка для непрерывного вымораживания и получения чешуйчатого льда:

1-основание; 2-ванна; 3-узел сальниковый; 4-ось; 5- устройство приводное; 6-барaban; 7- лента волнистая полиметаллическая; 8, 9-устройства для ввода и отвода хладагента соответственно; 10-устройство для удаления льда; 11-лоток.

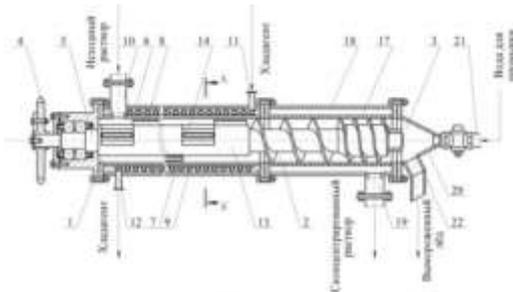
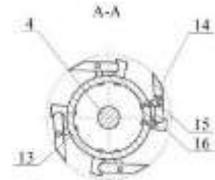


Рис. 40. Устройство для концентрирования растворов методом вымораживания влаги и получения льда:

1 – камера образования и роста кристаллов; 2 – камера разделения льда и концентрата, 3 - камера промывки льда; 4 – звездочка; 5 – вал; 6 – наружный корпус; 7 – корпус; 8 – змеевик; 9 - 10 – патрубок подачи раствора; 11, 12, 19, 21 – патрубки; 13 – пустотелый барабан; 14 – скребки; 15 – опорный элемент; 16 – опорный элемент; 17 – корпус перфорированный; 18 – рубашка; 20 – корпус конический



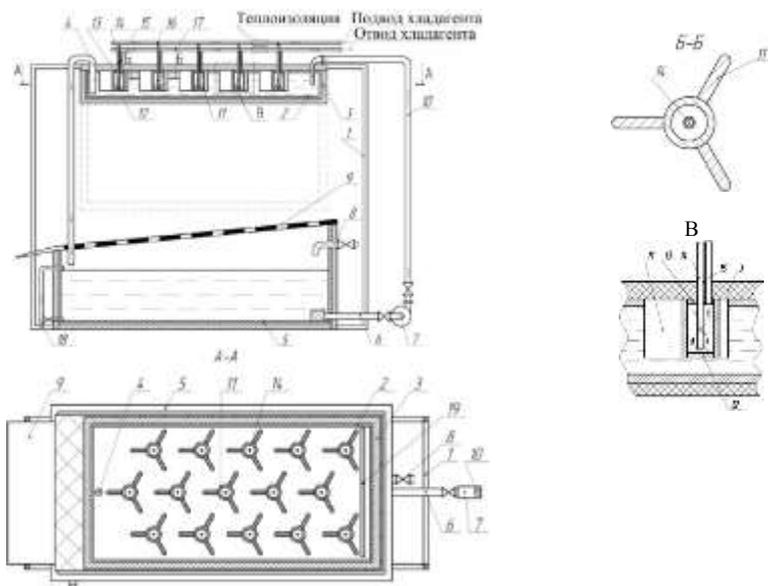


Рис. 41. Устройство для вымораживания и получения льда:

- 1 - корпус; 2 - рабочая ванна; 3 - теплоизоляция; 4 - патрубок сливной; 5 - накопительный бак; 6 - соединительный трубопровод; 7 - насос; 8 - трубопровод; 9 - желоб; 10 - нагнетательный трубопровод; 11 - охлаждающие элементы; 12 - днище глухое; 13 - днище проходное; 14 - патрубок подачи хладагента; 15 - патрубок отвода хладагента; 16 - трубопровод подачи хладагента; 17 - трубопровод отвода хладагента; 18 - патрубок; 19 - перфорированный коллектор

Произведена оценка стабильности, точности и устойчивости функционирования линии концентрирования творожной сыворотки, позволившая выявить направления ее совершенствования за счет повторного использования энергетического потенциала вымороженного льда.

Методом эксергетического анализа произведена оценка теплоэнергетической эффективности функционирования установки для вымораживания периодического действия, двухступенчатой вымораживающей установки непрерывного действия и технологической линии концентрирования пищевой крови.

Технико-экономический расчет показал, что эффективность внедрения кристаллизатора непрерывного действия составит 877 тыс.р./год, а установки периодического действия для сезонного концентрирования соковой продукции 146 тыс.р./год.

Эффективность внедрения результатов работы представлена ниже.

Эффективность внедрения результатов работы

Наименование разработки	Место внедрения и испытания	Результативность работы
Пат. № 2569021. Устройство для концентрирования жидких сред вымораживанием и получения льда	ООО «ГлавМясПром»	Договор № №23/18 от 14.09.2018 г.
Пат. № 2651279. Устройство для концентрирования растворов вымораживанием и получения льда	ООО «ГлавМясПром»	Договор № 39/18 от 29.10.2018 г.
Пат. № 2569021. Устройство для концентрирования жидких сред вымораживанием и получения льда	ООО «Воронежская холодильная компания»	Акт производственных испытаний
Способ производства концентрированного вишневого сока методом вымораживания	ООО «Сухиничский агропромышленный комбинат	Акт производственных испытаний
Способ производства концентрированных экстрактов поджелудочной железы, печени и желчи методом вымораживания влаги	ООО ГлавМясПром»	Акт производственных испытаний
Способ концентрирования творожной сыворотки методом вымораживания влаги	ЗАО «Алексеевский молочноконсервный комбинат»	Акт производственных испытаний
Способ производства концентрированной крови крупного рогатого скота методом вымораживания влаги	ООО ГлавМясПром»	Акт производственных испытаний

В приложении представлены материалы, подтверждающие практическую значимость, экономическую эффективность, апробацию и внедрение результатов работы.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Определены реологические, теплофизические и криоскопические свойства лиофильных и лиофобных жидких сред: экстрактов поджелудочной железы, печени, желчи, крови крупного рогатого скота, творожной сыворотки и вишневого сока; определено количество вымороженной влаги из них и изучены особенности поведения жидкостей при охлаждении.

2. Исследованы кинетические закономерности концентрирования

вымораживанием жидких сред в широком диапазоне изменения режимных параметров и выполнено комплексное сравнительное исследование жидкостей, сконцентрированных вымораживанием и вакуумным выпариванием.

3. Создана математическая модель вымораживания влаги на вращающейся цилиндрической поверхности, учитывающая характер теплообмена и удаления жидкой фазы вращающейся цилиндрической поверхностью.

4. Разработаны математические модели движения жидкой среды в шнековом канале и теплообмена при вымораживании творожной сыворотки в шнековом кристаллизаторе, учитывающее гидродинамическое поведение технологической среды в канале шнека, под воздействием градиента давления различной направленности и особенностей взаимодействия льда и жидкости.

5. Предложена математическая модель тепло – и массообмена при вымораживании льда на ребренной теплообменной поверхности, учитывающая нестационарный характер теплофизических характеристик вымороженного льда от температуры.

6. Обосновано математическое моделирование тепло – и массообмена вымораживания технологической среды на плоской поверхности с учетом переохлаждения жидкой среды в зоне кристаллизации льда.

7. Сформулированы концептуальные подходы к созданию высокоэффективных способов и техники для концентрирования вымораживанием жидких сред, направленные на интенсификацию тепловых и массообменных процессов с соответствующим аппаратным оформлением за счет моделирования и совершенствования конструкций кристаллизаторов.

8. Разработаны высокоэффективные конструкции кристаллизаторов для концентрирования вымораживанием жидких сред и получения льда и способы вымораживания с аккумулярованием теплоты хладагента, позволяющие обеспечить интенсивный теплообмен между хладагентом и концентрируемой жидкостью, а также методики их инженерного расчета.

9. Предложены условия алгоритмического управления процессами концентрирования вымораживанием жидких сред в кристаллизаторах непрерывного и периодического действия.

10. Выполнен эксергетический анализ процессов одноступенчатого, двухступенчатого концентрирования вымораживанием, а также линии концентрирования вымораживанием пищевой крови, подтвердивший термодинамическую эффективность предлагаемых инноваций.

11. Оценена стабильность, точность и устойчивость функционирования технологической системы концентрирования творожной сыворотки вымораживанием и предложены направления улучшения ее функционирования.

12. Произведена промышленная апробация технологических и технических решений при производстве концентрированных жидкостей из экс-

трактов поджелудочной железы, печени, желчи, крови крупного рогатого скота, творожной сыворотки и вишневого сока в кристаллизаторах непрерывного и периодического действия в условиях на ООО «ГлавМясПром» (г. Борисоглебск), ЗАО «Алексеевский молочно-консервный комбинат» (г. Алексеевка), ООО «Воронежская холодильная компания» (г. Воронеж), ООО «Сухиничский агропромышленный комбинат» (г. Сухиничи Калужской области).

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

τ - время, (любой момент времени) с; ω - относительное количество вымороженной влаги; δ - толщина, м; φ - угол погружения барабана в продукт, рад.; φ_0 - угол наклона плоскости касательной к поверхности барабана; α_p - теплопроводность жидкой фазы, Вт/(м²·К); α_c - теплопроводность хладагента, Вт/(м²·К); n - скорость вращения барабана, с⁻¹; $q_{кр}$ - удельная теплота кристаллизации, Дж/кг; R - радиус (текущая координата по радиусу), м; T_0 - температура кипения хладагента в барабане, К; $T_{кр}$ - криоскопическая температура; T_t - температура твердой фазы; $T_{ст}$ - температура стенки; СВ - содержание сухих веществ в продукте. %; T - температура, К; Re- критерий Рейнольдса; Gr- критерий Грасгофа; Pr- критерий Прандтля; Fo- критерий Фурье; K - критерий Кутателадзе, Nu - критерий Нуссельта. Bi_{op} - критерий Био при стабильном агрегатном состоянии.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

В изданиях, индексируемых в международных базах цитирования SCOPUS и Web of Science:

1. *Antipov, S.T.* Heat and Mass Transfer in Concentrating Liquid Media by Moisture Freeze-Out / S.T. Antipov, **V.Yu. Ovsyannikov** // Research J. Pharm. and Tech. 9(12): December 2016. Pp. 1451-1459.
2. **Ovsyannikov, V.Yu.** Investigation of Units Condition of Rotor-Type Milling Machines Based on Vibration Analysis / V.Yu.Ovsyannikov, A.I. Klychnikov, A.V. Sharov // Proceedings of the 4th International Conference on Industrial Engineering ICIE 2018. Springer Nature Switzerland AG 2019. P. 233-239.
3. **Ovsyannikov, V.Yu.** Concentration of cattle blood by moisture freezing // V.Yu. Ovsyannikov, A.I. Klychnikov, N. N. Lobacheva and A. A. Berestovoy // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 315 (2019) 042021. P. 1-6.

Монографии:

3. *Антипов С.Т.* Тепло – и массообмен при концентрировании жидких сред вымораживанием / С.Т. Антипов, В.Е. Добромиров, **В.Ю. Овсянников**; Воронеж. гос. технол. акад. Воронеж, 2004. – 208 с.

4. *Антипов С.Т.* Моделирование тепло – и массообмена в процессах концентрирования жидких сред вымораживанием / С.Т. Антипов, **В.Ю. Овсянников**, Я.И. Кондратьева, А.А. Корчинский. – Воронеж, 2019. – 150 с.

В периодических изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки РФ:

5. *Антипов С.Т.* Разработка модели анализа и прогноза основных характеристик процесса криоконцентрирования / С.Т. Антипов, А.Н. Рязанов, **В.Ю. Овсянников**, С.М. Ященко // Хранение и переработка сельхозсырья, 2001, №4.– С. 36-38.

6. *Антипов С.Т.* Расчет двухступенчатой вымораживающей установки непрерывного действия / С.Т.Антипов, **В.Ю. Овсянников** // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2001. - № 10. – С 61-63.

7. *Антипов С.Т.* Исследование охлаждения экстрактов поджелудочной железы, печени и желчи / С.Т. Антипов, **В.Ю. Овсянников** // Вестник международной академии холода. – 2002. - Вып. 4. – С. 36-37.

8. *Антипов С.Т.* Моделирование процесса намораживания твердой фазы на вращающейся цилиндрической поверхности / С.Т. Антипов, **В.Ю. Овсянников** // Вестник ВГТА. – 2002. - №7. – С 61-68.

9. *Антипов С.Т.* Исследование вымораживания влаги из экстрактов поджелудочной железы, печени и желчи крупного рогатого скота / С.Т. Антипов, **В.Ю. Овсянников** // Хранение и переработка сельхозсырья. № 6. 2002. – С. 18-20.

10. *Антипов С.Т.* Теплофизические характеристики водных экстрактов эндокринного и специального сырья крупного рогатого скота / С.Т. Антипов, **В.Ю. Овсянников** // Хранение и переработка сельхозсырья. № 3. 2003. – С. 30-32.

11. *Овсянников В.Ю.* Оптимизация режимов многоступенчатого вымораживания жидкостей по критерию условной себестоимости продуктов концентрирования // Хранение и переработка сельхозсырья. № 1. 2003. - С. 49-52.

12. *Антипов С.Т.* Совершенствование барабанных кристаллизаторов / С.Т. Антипов, **В.Ю. Овсянников**, А.Н. Рязанов // Хранение и переработка сельхозсырья. № 4. 2003. – С. 95-98.

13. *Антипов С.Т.* Исследование реологических свойств экстрактов поджелудочной железы, печени и желчи / С.Т. Антипов, **В.Ю. Овсянников** // Известия вузов. Пищевая технология. № 2/3. 2003. - С. 71-72.

14. *Кретов И.Т.* Влияние концентрирования на аминокислотный состав творожной сыворотки / И.Т. Кретов, **В.Ю. Овсянников**, С.Л. Панченко // Пищевая промышленность № 1. 2010. – С. 44-45.

15. **Овсянников В.Ю.** Определение режимов концентрирования яблочного сока вымораживанием // Хранение и переработка сельхозсырья. № 7. 2012. - С. 16-18.

16. **Овсянников В.Ю.** Концентрирование яблочного сока в барабанной вымораживающей установке / В.Ю. Овсянников, Я.И. Кондратьева, Н.И. Бостынец // Хранение и переработка сельхозсырья. № 4. 2014. - С. 41-44.

17. **Овсянников В.Ю.** Системное проектирование технологического потока производства концентрированных соков / В.Ю. Овсянников, Я.И. Кондратьева, Н.И. Бостынец // Хранение и переработка сельхозсырья. № 9. 2014. - С. 27 – 30.

18. **Овсянников В.Ю.** Исследование криоскопических температур и вымораживания влаги из плодовых соков / В.Ю. Овсянников, Я.И. Кондратьева, Н.И. Бостынец, А.Н. Денежная // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания, № 4, 2014. - С. 34-40.

19. *Антипов С.Т.* Кинетика процесса концентрирования вымораживанием вишневого сока / С.Т. Антипов, **В.Ю. Овсянников**, Я.И. Кондратьева // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. № 4. 2014. – С. 44-48.

20. **Овсянников В.Ю.** Исследование процесса циклического концентрирования вишневого сока вымораживанием / В.Ю. Овсянников, Я.И. Кондратьева, Н.И. Бостынец, А.Н. Денежная // Вестник международной академии холода. № 1. 2015. С. 4-8.

21. **Овсянников В.Ю.** Режимы поточно-циклического вымораживания вишневого сока / В.Ю. Овсянников, Я.И. Кондратьева, Н.И. Бостынец, А.Н. Денежная // Хранение и переработка сельхозсырья. № 2. 2015. - С. 5-9.

22. **Овсянников В.Ю.** Исследование процесса замораживания и размораживания плодовых соков / В.Ю. Овсянников, Я.И. Кондратьева, Н.И. Бостынец, А.Н. Денежная // Вестник международной академии холода. № 3. 2015. С. 23-27.

23. **Овсянников В.Ю.** Исследование процесса кристаллизации влаги при концентрировании вишневого сока / В.Ю. Овсянников, Я.И. Кондратьева, Н.И. Бостынец, А.Н. Денежная, Ю.С. Краминова // Пиво и напитки. № 5. 2015. - С. 36-39.

24. **Овсянников В.Ю.** Управление процессом низкотемпературного концентрирования жидких сред вымораживанием / В.Ю. Овсянников, Н.И. Бостынец, А.Н. Денежная, Я.И. Кондратьева // Автоматизация. Современные технологии. 2016. №2. С. 10-13.

25. **Овсянников В.Ю.** Анализ систем регенерации испарителей криоконцентраторов / В.Ю. Овсянников, С.М. Яценко, О.А. Семенихин, А.Н. Денежная // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2016. Т. 12. № 1. С. 50-54.

26. **Антипов С.Т.** Проектное моделирование технологической системы холодильного концентрирования жидких сред / С.Т. Антипов, **В.Ю. Овсянников**, А.А. Корчинский // Хранение и переработка сельхозсырья. № 4. 2016. - С. 17-21.

27. **Овсянников В.Ю.** Холодильное концентрирование творожной сыворотки / В.Ю. Овсянников, Ю.С. Краминова, С.Л. Панченко // Молочная промышленность. № 12. 2016 г. С. 55-57.

28. **Овсянников В.Ю.** Криоконцентрирование творожной сыворотки / В.Ю. Овсянников, Ю.С. Краминова, С.Л. Панченко // Молочная промышленность. № 1. 2017 г. С. 55-57.

29. **Овсянников В.Ю.** Эксергетический анализ технологической линии переработки и концентрирования крови / В.Ю. Овсянников, А.А. Корчинский, А.Н. Денежная, А.С. Москаленко // Хранение и переработка сельхозсырья. № 2. 2017. - С. 10-14.

30. **Антипов С.Т.** Эксергетический анализ концентрирующей вымораживающей установки / С.Т. Антипов, **В.Ю. Овсянников**, Я.И. Кондратьева, А.А. Корчинский // Вестник международной академии холода. № 2. 2017. С. 78-83.

31. **Антипов С.Т.** Исследование процесса охлаждения крови крупного рогатого скота / С.Т. Антипов, **В.Ю. Овсянников**, А.А. Корчинский // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. № 1. 2017. – С. 11-14.

32. **Антипов С.Т.** Исследование реологических и теплофизических характеристик крови крупного рогатого скота / С.Т. Антипов, **В.Ю. Овсянников**, А.А. Корчинский, А.А. Смирных // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. Т. 79, №3, 2017. С. 26-30.

33. **Антипов С.Т.** Исследование концентрирования крови крупного рогатого скота / С.Т. Антипов, **В.Ю. Овсянников**, А.А. Корчинский // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. Т. 80, № 2, 2017. С. 11 - 17.

Научно – технические издания:

34. Лабораторный практикум по курсу «Холодильная техника»: учеб. пособие / В.М. Кравченко, В.В. Пойманов, **В.Ю. Овсянников** [и др.]. – Воронеж. гос. технол. акад. – Воронеж, ВГТА, 2010. – 56 с.

35. Практикум по курсу «Теория технологического потока»: учеб. пособие / С.А. Назаров, **В.Ю. Овсянников**. – Воронеж : ВГУИТ, 2012. – 112 с.

36. Проектирование, конструирование и расчет техники пищевых технологий: Учебник / С.Т. Антипов, Васильев А.М., Дворецкий С.И. [и др.]. Учебник/ Под ред. акад. РАСХН В.А. Панфилова. СПб.: Издательство «Лань», 2013. – 912 с.

37. Инновационное развитие техники пищевых технологий: Учебное пособие / С.Т. Антипов, А.В. Журавлев, Д.А. Казарцев, А.Г. Мордасов и др.; под ред. акад. РАН В.А. Панфилова. СПб.: Издательство «Лань», 2016. – 660 с.

38. Холодильная техника. Лабораторный практикум: / В.В. Пойманов, **В.Ю. Овсянников**, В.Н. Шаршов [и др.]; Воронеж гос. ун-т инж. технол. – Воронеж: ВГУИТ, 2018. – 56 с.

Патенты на изобретения:

39. Пат. № 2206839 РФ, МПК⁷ F25C1/14. Установка для вымораживания и получения чешуйчатого льда / Антипов С.Т., Рязанов А.Н., **Овсянников В.Ю.**; Заявитель и патентообладатель, Воронеж гос. технол. акад. - № 2001129629/13; заявл. 01.11.2001; опубл. 20.06.2003; Бюл. № 17.

40. Пат. № 2220385 Россия, МПК⁷F25 C1/14. Установка для получения чешуйчатого льда / Антипов С.Т., Рязанов А.Н., **Овсянников В.Ю.**; Заявитель и патентообладатель, Воронеж гос. технол. акад. - № 2002108773/13; заявл. 05.04.2002; опубл. 27.12.2003; Бюл. № 36.

41. Пат. № 2221202 Россия, МПК⁷F 25 C1/14, 1/00. Кристаллизатор для непрерывного вымораживания и получения чешуйчатого льда / Антипов С.Т., **Овсянников В.Ю.**, Рязанов А.Н.; Заявитель и патентообладатель, Воронеж гос. технол. акад. - № 2002129080/12; заявл. 30.10.2002; опубл. 10.01.2004; Бюл. №1.

42. Пат. № 2228493 Россия, МПК⁷ F25 C1/14. Способ непрерывного вымораживания и получения чешуйчатого льда с аккумулярованием теплоты хладагента и установка для его осуществления / Антипов С.Т., **Овсянников В.Ю.**, Рязанов А.Н.; Заявитель и патентообладатель, Воронеж гос. технол. акад. - № 2002130134/12; заявл. 10.11.2002; опубл. 10.05.2004; Бюл. № 13.

43. Пат. № 2235581 Россия, МПК⁷ B01 D9/04, G 05, D27/00, F 25 B 11/00. Способ автоматического управления процессом вымораживания влаги в двухступенчатой вымораживающей установке / Антипов С.Т., **Овсянников В.Ю.**; Заявитель и патентообладатель, Воронеж гос. технол. акад. - № 2002132338/12; заявл. 02.12.2002; опубл. 10.09.2004; Бюл. № 25.

44. Пат. № 2344722 Россия, МПК⁷A 23L 2/08, F25C 1/14. Кристаллизатор для концентрирования жидкостей / Кретов И.Т., **Овсянников В.Ю.**, Панченко С.Л.; Заявитель и патентообладатель, Воронеж гос. технол. акад. - № 2007106340/13; заявл. 19.02.2007; опубл. 27.08.2008; Бюл. № 24.

45. Пат. № 2569021 Россия, МПК F25C 1/08. Устройство для концен-

трирования жидких сред вымораживанием и получения льда / Антипов С.Т., **Овсянников В.Ю.**, Кондратьева Я.И., Бостынец Н.И.; Заявитель и патентообладатель, Воронеж гос. ун-т. инж. технол. - № 2014132681/13; заявл. 07.08.2014; опубл. 20.11.2015; Бюл. № 32.

46. Пат. № 2581874 Россия, МПК В01D 9/04 (2006.01). Способ автоматического управления циклическим процессом концентрирования вымораживанием / Антипов С.Т., **Овсянников В.Ю.**, Кондратьева Я.И., Бостынец Н.И., Денежная А.Н.; Заявитель и патентообладатель, Воронеж гос. ун-т. инж. технол. - № 2015100177/05; заявл. 13.01.2015; опубл. 20.04.2016; Бюл. № 11.

47. Пат. № 2651279 Россия, МПК F25C 1/08 (2006.01). Устройство для концентрирования растворов вымораживанием и получения льда / Антипов С.Т., **Овсянников В.Ю.**, Денежная А.Н.; Заявитель и патентообладатель, Воронеж гос. ун-т. инж. технол. - № 2017108742/42; заявл. 16.03.2017; опубл. 19.04.2018; Бюл. № 11.

48. Пат. № 2668294 Россия, МПК F25C 1/00 (2006.01). Устройство для концентрирования растворов методом вымораживания влаги и получения льда / Антипов С.Т., **Овсянников В.Ю.**, Краминова Ю.С., Москаленко А.С.; Заявитель и патентообладатель, Воронеж гос. ун-т. инж. технол. - № 2017139757; заявл. 15.11.2017; опубл. 28.09.2018; Бюл. № 28.

49. Пат. № 2674456 Россия, МПК F25C 1/00 (2006.01). Кристаллизатор непрерывного действия для получения чешуйчатого льда / Антипов С.Т., **Овсянников В.Ю.**, Шарова Н.И., Корчинский А.А.; Заявитель и патентообладатель, Воронеж гос. ун-т. инж. технол. - № 2017111983; заявл. 10.04.2017; опубл. 10.12.2018; Бюл. № 34.

Подписано в печать 11.09.2019 г. Формат 60 x 84 1/16

Усл. печ. л. 2,0. Тираж 100 экз. Заказ №

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий»
(ФГБОУ ВО «ВГУИТ»)

Отдел полиграфии ФГБОУ ВО «ВГУИТ»

Адрес университета и отдела полиграфии

394036, г. Воронеж, пр. Революции, 19