

Авторефер
Б91

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ
имени М.В.ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи
Для служебного пользования
Экз. № 00002

БУРДО Олег Григорьевич

УДК 664:621.1.016.4:621.56

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ И АППАРАТОВ
ПИЩЕВОЙ И ХЛОДИЛЬНОЙ ТЕХНОЛОГИЙ НА ОСНОВЕ АВТОНОМНЫХ
ТЕПЛОПЕРЕДАЮЩИХ УСТРОЙСТВ

Специальность 05.18.12 - процессы и аппараты
пищевых производств

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой
степени доктора технических наук

Одесса - 1988

ДСП. Исх. №	11
Осп.	Прилож.
8	04
1988 г.	

Работа выполнена в Одесском технологическом институте
пищевой промышленности им. М.В.Ломоносова.

Официальные оппоненты: Заслуженный деятель науки УССР,
доктор технических наук, профессор
И.Г.Чумак ;
доктор технических наук, профессор
В.В.Галактионов ;
доктор технических наук, профессор
Б.И.Леончик.

Ведущая организация - Всесоюзный научно-исследовательский
конструкторско-технологический
институт холодильной промышленности
(ВНИКТИхолодпром).

Защита состоится " 9 " июня 1988 г. в _____ час.
на заседании специализированного совета Д 068.35.01 при Одесском
технологическом институте пищевой промышленности им. М.В.Ломоно-
сова, 270039, г.Одесса, 39, ул.Свердлова, 112.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Одесского техно-
логического института пищевой промышленности им. М.В.Ломоносова

Автореферат разослан " _____ " _____ 1988г.

017893
ХТ

Е.Г.Кротов

ОНАХТ 27.09.10
Совершенствование пр



v017893

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Техническое перевооружение и перестройка производственного потенциала агропромышленного комплекса, предусмотренные Продовольственной программой СССР, направлены на дальнейшее развитие пищевой промышленности для обеспечения роста производства в XI-ой пятилетке на 18...20%. Вместе с тем, производство продовольствия — одна из энергоёмких отраслей народного хозяйства. Предприятия АПК занимают 6 место среди промышленных ведомств по потреблению топливно-энергетических ресурсов, поэтому проблема экономии топлива в технологиях пищевых и перерабатывающих производств стоит особо остро. С ростом энергопотребления всё большую актуальность приобретает и экологическая проблема.

Курс на интенсивное использование производственного потенциала, на внедрение в промышленность ресурсосберегающих и безотходных технологий часто связан с необходимостью совершенствования существующей теплотехнологии, поиском новых, нетрадиционных решений при организации процессов термообработки продуктов. Однако, в пищевой технологии наблюдается некоторый консерватизм в вопросах внедрения прогрессивных технических решений в области теплотехники и холодильной техники.

Анализ развития теплотехнологии в энергоёмких отраслях (химической, металлургической, энергетической) и в технике, где регламентации температурных режимов наиболее жесткие (лазерная, радиоэлектронная, космическая и др.), показывает, что в СССР и в индустриально развитых странах наметился значительный интерес к новым высокоэффективным теплопередающим устройствам: тепловым трубам и термосифонам. Эти устройства отличаются очень низким внутренним термическим сопротивлением, высокой степенью изотермичности теплопередающей поверхности, автономностью и т.п. Уникальные свойства тепловых труб и мировая практика их применения в технике позволяют рассчитывать, что внедрение теплопередающих устройств в теплотехнологии АПК будет способствовать эффективной реализации Продовольственной и Энергетической программ СССР.

Многогранность и динамизм проблемы внедрения ТПУ в пищевую технологию, обусловленные большим разнообразием продуктов, процессов и аппаратов, подлежащих анализу, полное отсутствие опыта проектирования подобных систем требуют создания основ теории процессов и аппаратов с ТПУ для обоснованного поиска рациональных технических решений.

Цель работы - разработка основ теории и практики совершенствования теплотехнологических процессов и аппаратов пищевых производств на основе автономных теплопередающих устройств.

Задачи работы. Поставленная цель обуславливает решение следующих задач.

1. Классифицировать основные теплотехнологические процессы пищевых производств и выбрать перспективные пути их совершенствования с учетом возможностей ТПУ.
2. Разработать математические модели теплового состояния процессов с граничными условиями, учитывающими специфику ТПУ.
3. Обосновать для теплотехнологий АПК перспективные типы ТПУ, определить круг проблем, требующих экспериментального изучения.
4. Исследовать процессы и разработать основы проектирования аппаратов с ТПУ.
5. Разработать, исследовать и испытать в производственных условиях теплотехнологические процессы и аппараты, реализующие достоинства ТПУ.

Объект исследования. Процессы аппараты для тепловой и холодильной обработки пищевых продуктов.

Основная идея работы: использовать автономность ТПУ для рациональной организации тепловых режимов технологических процессов и управления процессами при термообработке продуктов.

Научная новизна. Основными научными результатами работы являются:

1. Совокупность физических представлений, результаты комплексных исследований, методы расчета процессов тепломассопереноса при термообработке продуктов с помощью ТПУ:

- модель стационарной и нестационарной теплопроводности мясной туши при наличии внутренних стоков (источников) тепла;
- модель кристаллизации растворителя на поверхности ТПУ;
- модель и результаты экспериментальных (в т.ч. и визуальных) исследований впервые установленного испарительно-пульсационного режима парообразования в канальных структурах ТТ, полученные методом ЭТА и экспериментально закономерности процессов парообразования и конденсации на профилированных поверхностях;
- модель контактной теплопередачи и результаты моделирования тепловых разъемов методом ЭТА с учетом упругой деформации и неплоскостности в зоне сопряжения;
- экспериментально выявленные закономерности теплоотдачи при обтекании слоем зерна поверхности ТПУ.

2. Методы расчета и оптимизации аппаратов на основе ТПУ:

- сопряженная теплогидродинамическая модель оптимизации параметров тепловых труб;

- методика оптимизации на ЭВМ параметров аппаратов с ТТ и коэффициентный метод оптимизации конструкции с ТТ;

- инженерные методики расчета канальных ТТ и аппаратов с ТПУ.

3. Методы и средства испытания тепловых труб и прогнозирования их ресурсных характеристик.

4. Новые принципы организации холодильных циклов и реализующие эти циклы оригинальные конструкции холодильных труб.

5. Новые технологии пищевых производств:

- интенсивной термообработки мясных туш на основе МИГ;

- монолитной кристаллизации растворителя на поверхности ТПУ при криоконцентрировании соков, пищевых красителей, ароматизаторов.

6. Аппаратурное оформление на основе ТПУ теплотехнологий зерносушения, мясомолочной и консервной промышленности.

Комплекс выполненных теоретических и экспериментальных исследований позволяет определить области рационального использования ТПУ в пищевой и в перерабатывающей промышленности и дать оценку их фактической эффективности. Результаты работы являются научным заделом для развития нового перспективного направления в исследованиях технологий термообработки продуктов на основе ТПУ. Новизна исследований подтверждается 26 авторскими свидетельствами на изобретения.

В работе защищаются следующие научные положения.

1. Эффективный путь совершенствования процессов и аппаратов теплотехнологий пищевых и перерабатывающих производств - использование автономных тепл передающих устройств, работающих по замкнутому испарительно-конденсационному циклу. При этом можно организовать ресурсо- и энергосберегающие технологические цепи с соблюдением всех требований по качеству продукта:

- в процессе термообработки пищевых продуктов, когда определяющим является внутреннее термическое сопротивление, время термообработки можно сократить путем воздействия посредством ТПУ на "термические центры" продукта;

- сочетание высокой эффективной теплопроводности ТПУ и изотермичности его испарителя позволяет осуществить на поверхности ТПУ направленную монолитную кристаллизацию из раствора воды с плотной упаковкой кристаллов льда без практического включения концентрата.

2. Габариты, компоновка и уровни тепловых потоков обуславли-

вают преимущественное применение в аппаратах гравитационных тепловых труб с канальной структурой, интенсивность теплоотдачи при испарении в которых определяется аддитивностью термических сопротивлений подложки, смоченного канала и плёнки жидкости. Термическое сопротивление смоченного канала определяется радиусом кривизны мениска на границе раздела фаз.

3. Гидродинамические условия подпитки системы параллельных капиллярных каналов, при определенных соотношениях гидравлических сопротивлений на входе и в канале, приводят к периодическому орошению каналов, что сопровождается пульсациями температур стенки ТТ. Уровень тепловых потоков, соответствующих началу кипения в каналах, главным образом определяется материалом корпуса и теплоносителем.

4. Сочетание принципов работы автономных перекачивающих устройств (капиллярных, осмотических, инерционных и др.) и известных холодильных циклов приводит к созданию нового класса транспортных теплоиспользующих генераторов холода - холодильных труб.

Практическая значимость и реализация. В работе впервые поставлена и частично решена важная научно-техническая задача совершенствования процессов и аппаратов технологий пищевой и перерабатывающей промышленности на основе ТПУ. Разработанные основы теории и практики применения ТПУ в теплотехнологии АПК помогут в создании и широком внедрении новых принципов организации тепловых режимов при термообработке продуктов.

Представленные в работе исследования проводились в рамках Координационного плана работ стран-членов СЭВ по проблеме: "Разработка предложений по совершенствованию действующих и созданию новых прогрессивных технологических процессов и оборудования для энергоёмких производств"; в соответствии с тематикой Координационного плана научно-исследовательских работ по комплексной проблеме "Теплофизика" АН СССР на 1981-1986гг. (шифр 1.9.7.6); выполнялись по Постановлениям СМ СССР и приказа Минвуза СССР (МР/7с и МР/71с); включены в Координационный план НИР Минхлебопродуктов СССР, в Государственный план экономического и социального развития СССР (шифр 11ГЗН).

Разработанный теплообменник-утилизатор на ТТ рекомендован министерством хлебопродуктов СССР к широкому внедрению на хлебопекарных, макаронных и хлебоприёмных предприятиях отрасли. Утилизация тепла на зерносушилке ДСП-32А теплообменником с ТТ дает экономию топлива на сумму 2,99 тыс. рублей в месяц. Методики инженерного расчета ТТ, испытания и прогнозирования их характеристик, оптимизации параметров аппаратов с ТПУ внедрены на предприятиях Минсудпрома и Минобще-

машина с экономической эффективностью 336 тыс.рублей в год. Экономический эффект от внедрения выполненных разработок в технологии серийного производства ТТ типоразмерного ряда составил 52 тыс. рублей, конструктивных элементов на их основе - 251,6 тыс.рублей. Внедрение технологии интенсивного охлаждения мяса с помощью МИГ на мясокомбинате производительностью 100 т в сутки даст годовой экономический эффект более 80 тыс.рублей. Указанная технология патентуется в 15 странах с развитой мясной индустрией.

Совокупность полученных в диссертационной работе результатов по оценке автора может рассматриваться как новое научное направление в процессах и аппаратах пищевых производств.

Апробация работы. Основные результаты работы были представлены на III-ей (Талло Альто, США, 1978г.) и VI-ой (Гренобль, 1987г.) международных конференциях по тепловым трубам. Положения работы докладывались и получили одобрение:

- на заседаниях подсекции "Тепловые трубы" Научного Совета АН СССР по комплексной проблеме "Теплофизика и теплоэнергетика" (г.Москва, 1982, 1984, 1986г.г., г.Одесса, 1985, 1987г.г.);

- на Всесоюзных конференциях: "Двухфазный поток в энергетических машинах и аппаратах" (г.Ленинград, 1978, 1985г.г.); "Искусственный холод в отраслях агропромышленного комплекса" (г.Кишинев, 1987г.); "Использование техники и технологии в целях повышения эффективности пищевых производств" (г.Таллин, 1981г.); "Проблемы энергетики в теплотехнологии" (г.Москва, 1987г.); "Пути интенсификации производства и применение искусственного холода в отраслях АПК" (г.Ташкент, 1985г.); "Разработка и совершенствование технологических процессов, машин и оборудования для производства, хранения и транспортировки продуктов питания" (г.Москва, 1987г.); по олодильному машиностроению (г.Ташкент, 1980г., г.Одесса, 1982г.); по тепловым трубам (г.Минск, 1979г., г.Киев, 1976, 1977, 1979, 1982, 1987г.г., г.Обнинск, 1979г.); по математическому моделированию и методам оптимизации (г.Киев, 1974, 1976г.г.).

Публикации. Основное содержание диссертационной работы изложено в 63 публикациях, из которых 26 авторских свидетельств на изобретения.

Объём и структура работы. Диссертация состоит из введения, 8 глав, заключения и приложения. Работа изложена на 274 страницах машинописного текста, включает 39 таблиц, 141 рисунок. Эпиграф: использованной литературы содержит 306 источников, среди которых 61 работа зарубежных авторов. Приложения на 62 страницах, включают 24 рисунка и 2 таблицы.

ПУТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕПЛОТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ

Большинство технологических процессов пищевых производств протекает при тепловой и холодильной обработке продукта. Как правило, пищевой продукт является термочувствительным материалом и на его качество оказывают существенное влияние и уровень температур, и продолжительность процесса термообработки. Оптимальная организация тепловых режимов пищевых производств определяет и органолептические показатели готовой продукции, и затраты энергии на её переработку и производительность аппаратов. Поэтому успехи современной технологии пищевых производств основаны на фундаментальных работах отечественных ученых, работающих как в области технологии, так и в области тепломассообмена.

Анализ показывает, что в настоящее время нет ещё должного уровня понимания процессов, отсутствуют эффективные технические решения для оптимизации процессов термообработки продуктов, уменьшения потерь летучих компонентов при концентрировании жидкостей. Остаются актуальными работы по созданию малоотходных и энергосберегающих технологий, позволяющих комплексно использовать все содержащиеся в сырье вещества. Нерешенными остаются вопросы утилизации тепловых стоков пищевых производств, уменьшения загрязнения окружающей среды, использования естественного холода.

Применение ТПУ, работающих по замкнутому испарительно-конденсационному циклу, открывает новые возможности по организации процессов теплопередачи в технологиях пищевых производств. При этом нужно использовать следующие достоинства ТПУ: их автономность, чрезвычайно низкое внутреннее термическое сопротивление, высокую степень изотермичности теплопередающей поверхности. Технологический аппарат с ТПУ содержит ряд однотипных независимых элементов, имеющих одинаковые характеристики. Тепловая труба является удобной конструктивной развязкой, аппарат на основе ТПУ прост в монтаже и в эксплуатации, допускает быструю разборку для профилактики и ремонта. ТПУ не требует для работы никаких вспомогательных устройств.

Проведенная работа по детальной классификации процессов термообработки продуктов определила, что круг задач, которые можно решать в теплотехнологии АПК на основе ТПУ, чрезвычайно широк (рис. I). Естественно, не все задачи одинаково перспективны, не все решения в настоящее время найдены. Но, очевидно, что направление использования ТПУ в теплотехнологиях АПК является новым, актуальным и перспективным, представляющим научный интерес как для пищевой теплотехнологии, так

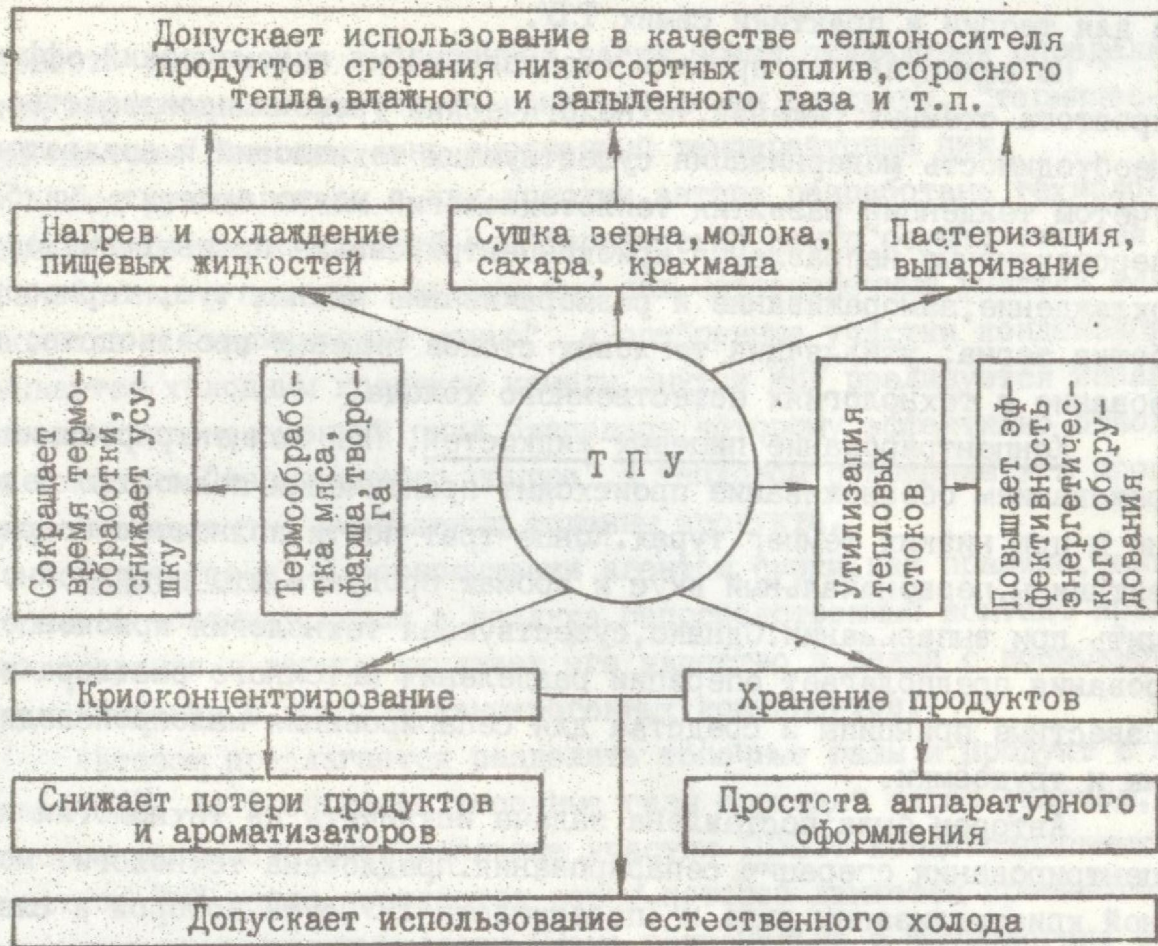


Рис. 1 Эффект от применения ТПУ в теплотехнологиях АПК

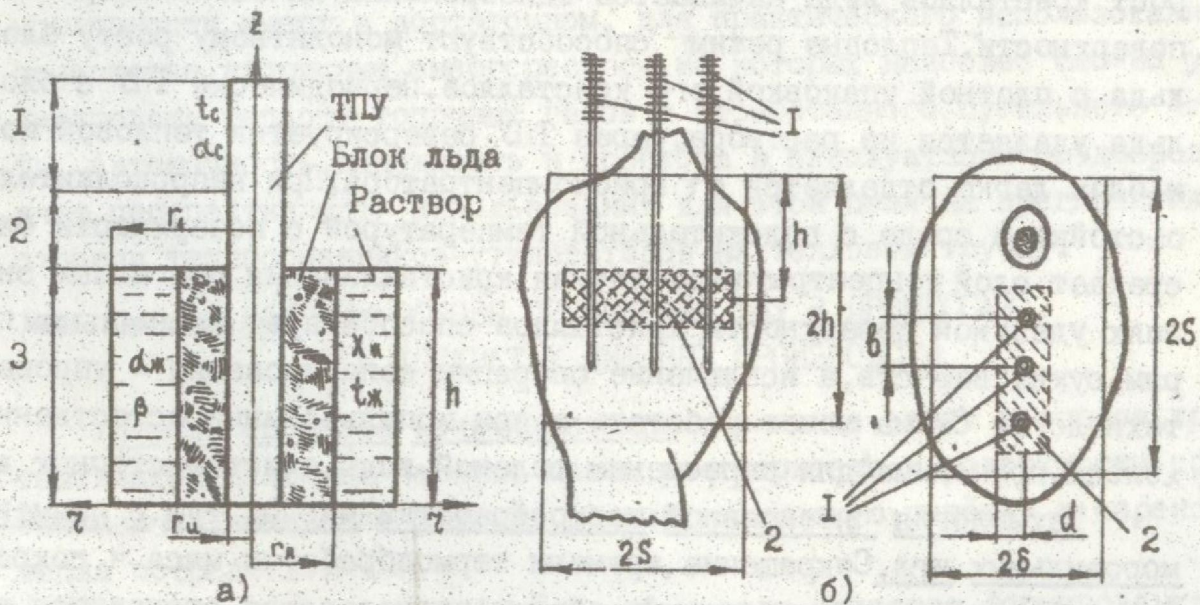


Рис. 2 Тепловые модели

- а) кристаллизации: 1-конденсатор; 2-транспортная зона; 3-испаритель
- б) термообработки туши: 1-морозильные иглы; 2-термический центр туши

и для теории и практики самих ТЛУ.

По совокупности проблем (социальный и экономический эффект, простота схемных решений, технологический уровень производства ТЛУ, необходимость модернизации существующих технологий и аппаратов) с учетом тенденций развития теплотехнологий можно выделить наиболее перспективные направления: криоконцентрирование пищевых жидкостей; охлаждение, замораживание и размораживание мясных туш; термообработка зерна; утилизация тепловых стоков пищевых производств; использование в технологиях естественного холода.

Концентрирование пищевых жидкостей. При концентрировании вымораживанием обезвоживание происходит практически полностью селективно и при низких температурах. Концентрат почти полностью сохраняет витамины, первоначальный вкус и аромат продукта, что невозможно получить при выпаривании. Однако, существующая технология криоконцентрирования предполагает операции разделения маточного раствора и льда. Известные принципы и средства для сепарирования малопродуктивны и трудоёмки.

Автором была поставлена задача исключить из технологии криоконцентрирования операцию сепарирования. Предложена технология монолитной кристаллизации льда на поверхности ТЛУ, суть которой в следующем. В раствор помещаются криоконцентраторы, которыми являются испарительные участки тепловых труб либо термосифонов. Конденсационные участки омываются охлаждающей средой. Благодаря низкому термическому сопротивлению ТЛУ, высокой степени изотермичности поверхности рост кристаллов льда начинается одновременно на всей испарительной поверхности. Тепловые режимы способствуют монолитному росту блока льда с плотной упаковкой его кристаллов. Периодически ТЛУ с блоком льда удаляется из раствора, через ТЛУ реверсируется тепловой поток и блок легко отделяется от криоконцентратора. При непродолжительной выдержке в среде с положительной температурой с поверхности блока стекает слой концентрата. Монолитная кристаллизация при малых значениях удельной поверхности кристаллов способствует минимальным потерям сухих веществ, а исключение операции сепарирования — упрощению технологии. Схема может работать и при использовании естественного холода, применима для опреснения соленой воды, очистки сточных вод.

Технология интенсивной термообработки мясных туш с применением морозильных игл. Сокращение времени термообработки мяса и сокращение его потерь при увеличении объема производства становится всё более острой проблемой. Традиционной является технология термообработки мяса в тушах и в полутушах, для которой характерна неравно-

мерность температур в бедренной части. Время охлаждения определяется внутренним термическим сопротивлением продукта, "термическим центром", имеющим явно выраженный температурный пик.

Под руководством и при участии автора разработана технология термообработки, по которой на "термический центр" осуществляется воздействие с помощью морозильных игл. Остроконечные участки МИГ вводятся в "термический центр", а оребренные участки конденсации омываются холодным воздухом камеры. Внутри МИГ реализуется испарительно-конденсационный цикл, благодаря которому эффективно отводится тепло из "термического центра". В тепловом отношении эта процедура эквивалентна уменьшению толщины продукта.

Сушка зерна. В зерносушении агентом сушки, как правило, является смесь топочных газов и воздуха. Непосредственный контакт продуктов сгорания с зерном ухудшает его качество в связи с возможностью проникновения в продукт канцерогенных компонентов.

Автором предлагается разделить топочные газы и продукт с помощью ТПУ. По I-ой схеме топочные газы проходят через газоход, в котором размещены испарительные участки ТПУ. От конденсационных участков ТПУ тепло передается зерну, которое движется противотоком гравитационным пластным слоем. Схема рациональна в технологиях сушки термолабильных материалов, мелкодисперсной среды, зерна.

II-ая схема предусматривает конвективную сушку зерна воздухом, нагретым от топочных газов в теплообменнике-калорифере с ТПУ.

Утилизация вторичных энергоресурсов. Предприятия пищевой промышленности имеют в достаточном, для практического использования, количестве вторичные энергоресурсы, из которых наиболее сложно утилизировать теплоту топочных газов и отработанного сушильного агента. Автономность, надежность и простота в эксплуатации предопределяют перспективность использования для этой цели на предприятиях отрасли теплообменников-утилизаторов на тепловых трубах.

НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ТПУ В ПРОЦЕССАХ И АППАРАТАХ ПИЩЕВЫХ ПРОИЗВОДСТВ

Модель процесса кристаллизации. Основные этапы процесса кристаллизации включают перенос массы растворителя к поверхности кристаллизации, внедрение молекул в кристаллическую решетку и перенос тепла посредством ТПУ.

Исходным элементом физической модели является формирование представительной ячейки, объем которой выразим отношением полного объема к числу ТПУ. Приведем теплофизическую модель кристаллизации к эквивалентному цилиндру (рис. 2а). Анализ ведём с цилиндрической сис-

теме координат, считая, что параметры по азимуту не меняются. Допускаем, что транспортная зона ТПУ находится в адиабатных условиях и не влияет на тепломассоперенос в системе. Для общего случая модель кристаллизации, при записи температур как избыточных по отношению к t_c , имеет вид:

а) для продукта $0 \leq z \leq h$

$$\frac{\partial r_\lambda}{\partial \tau} = \beta \frac{\rho_{\text{ж}}}{\rho_\lambda} [X_{\text{ж}}(\tau) - X_{\text{н}}(t_{\text{н}})] \quad r_\lambda \leq r \leq r_1 \quad (1)$$

$$-\frac{\partial [X_{\text{ж}}(\tau)]}{\partial \tau} = \beta \frac{2r_u}{r_1^2 - r_\lambda^2} [X_{\text{ж}}(\tau) - X_{\text{н}}(t_{\text{н}})] \quad r_\lambda \leq r \leq r_1 \quad (2)$$

$$X_{\text{н}} = f(t_{\text{н}}); \quad t_{\text{н}} = t_\lambda \quad r = r_\lambda \quad (3)$$

$$C_{\text{рж}} V_{\text{ж}} \rho_{\text{ж}} \frac{\partial v_{\text{ж}}}{\partial \tau} + \rho_\lambda \Lambda F_\lambda \frac{\partial r_\lambda}{\partial \tau} = Q_\tau \quad r_\lambda \leq r \leq r_1 \quad (4)$$

$$\Lambda_\lambda \frac{\partial v_\lambda}{\partial r} = \alpha_{\text{ж}} (v_{\text{ж}} - v_\lambda) + \rho_\lambda \Lambda \frac{\partial r_\lambda}{\partial \tau} \quad r = r_\lambda \quad (5)$$

б) для блока льда $0 \leq z \leq h$

$$\frac{\partial v_\lambda}{\partial \tau} = a_\lambda \left[\frac{\partial^2 v_\lambda}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\lambda}{\partial r} \right] \quad r_u \leq r \leq r_\lambda \quad (6)$$

$$\Lambda_\lambda \frac{\partial v_\lambda}{\partial r} = \Lambda_{\text{м}} \frac{\partial v_{\text{м}}}{\partial r}; \quad t_\lambda = t_{\text{м}} \quad r = r_u \quad (7)$$

в) для испарителя ТПУ $0 \leq z \leq h$

$$\Lambda_{\text{м}} \frac{\partial v_{\text{м}}}{\partial r} = \alpha_{\text{м}} (v_{\text{м}} - v_{\text{н}}) \quad r = r_u \quad (8)$$

г) для конденсатора ТПУ $z > h$

$$\alpha_{\text{к}} (v_{\text{н}} - v_{\text{к}}) = \alpha_0 v_{\text{к}} \quad r = r_u \quad (9)$$

$$Q_\tau = v_{\text{м}} \left[\frac{\ln \frac{r_u}{r_\tau}}{2\pi \Lambda_{\text{м}}} \left(\frac{1}{h} + \frac{1}{l_{\text{к}}} \right) + \frac{1}{\alpha_{\text{м}} F_{\text{м}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{к}} F_{\text{к}}} \right]^{-1} \quad r = r_u \quad (10)$$

В приведенной системе уравнений пренебрегается распределенностью температур по толщине стенки ТПУ, ограниченной радиусами r_τ и r_u .

При установившемся режиме работы можно принять, что концентрация продукта в ячейке одного ТПУ постоянна и не зависит от времени ($X_{\text{ж}}$). Пренебрегая распределенностью температур по элементам тепловой модели и рассматривая процесс кристаллизации на ТПУ как квазистационарный, задачу можно свести к поиску радиуса блока льда и температуры на поверхности кристаллизации:

$$\bar{r}_\lambda = \sqrt{1 + \left[Nu_{\text{м}}' Fo' \frac{\rho_{\text{ж}}}{\rho_\lambda} (\bar{X}_{\text{ж}} - \bar{X}_{\text{н}}) \right]^2 + Nu_{\text{м}}' Fo' \frac{\rho_{\text{ж}}}{\rho_\lambda} (\bar{X}_{\text{ж}} - \bar{X}_{\text{н}})} \quad (11)$$

$$\vartheta_{\Lambda} = (M \Lambda R_{\Lambda c} + B i \vartheta_{*}) (1 + B i)^{-1}, \quad (12)$$

где $\bar{r}_{\Lambda} = \frac{r_{\Lambda}}{r_u}$ $Nu' = \frac{\beta r_u}{D}$ $Fo' = \frac{D \tau}{r_u^2}$,

а $R_{\Lambda c}$ - термическое сопротивление в цепи "лёд-ТПУ-среда".

Тепловые режимы продукта с внутренними стоками (источниками) тепла. Известные физические модели для расчета продолжительности охлаждения туши основаны на решении уравнений теплопроводности тел канонической формы (бесконечные пластина и цилиндр, шар). Приемлемая точность расчета температуры в центре бедра достигается корректировкой идеализированных моделей эмпирическими коэффициентами формы. Но такой метод не позволяет рассчитать температурное поле по толщине, что в задаче с внутренними стоками тепла в виде МИГ становится существенным.

Представим теплофизическую модель бедренной части в виде параллелепипеда, в центре которого размещены МИГ (рис.26). Считая, что теплофизические свойства мяса и размеры туши в режиме охлаждения не изменяются, привлечем для расчета температурных полей принцип суперпозиции. Температура в какой-либо точке туши определяется алгебраической суммой действия источников на поверхностях трёх пластин толщиной 2δ , $2S$, $2h$ и источников в виде цилиндров радиусом r_u . Тогда температура в "термическом центре" туши равна

$$t_u = t_0 - \left(\frac{\vartheta_u}{\vartheta_0} \right)_{\delta} \left(\frac{\vartheta_u}{\vartheta_0} \right)_S \left(\frac{\vartheta_u}{\vartheta_0} \right)_h \left(\frac{\vartheta_u}{\vartheta_0} \right)_r (t_0 - t_c). \quad (13)$$

Безразмерные комплексы в уравнении (13), имеющие индексы δ , S , h находятся по известным номограммам для пластин в зависимости от чисел Fo и Bi . Для МИГ температурное поле определяется числом Фурье ($Fo_r = \alpha \tau / r_u^2$) и безразмерной координатой ($\eta = r / r_u$). В работе приведены соответствующие номограммы и схема расчета температур.

В режиме замораживания изменяются условия на границе. Появляется зона замороженного слоя, ограниченная радиусами r_u и r_{Λ}

$$r_{\Lambda} = \sqrt{r_u^2 + \frac{2 \alpha_n \vartheta_{сеп} \tau}{\Lambda \ln(r_{\Lambda} / r_u)}} \quad (14)$$

В случае термообработки с помощью МИГ пастообразного продукта или насыпи зерна, овощей, в расчете используются эквивалентные значения теплофизических параметров продукта.

При моделировании теплообмена движущегося слоя зерна с поверхностью ТПУ выделена представительная ячейка с площадью живого поперечного сечения, равной сечению шахты. Слой рассматривается как дискретная двухкомпонентная система "газ-зерно", омывающая поверхность

ТПУ. Для каждого компонента описание теплоотдачи проводилось как для сплошной среды с помощью упрощенных дифференциальных уравнений.

Практическая реализация моделей связана с необходимостью получения зависимостей для расчета интенсивности теплообмена как внутри ТПУ, так и на границах "ТПУ-продукт", "ТПУ-элемент аппарата". Определение указанных закономерностей и составило предмет экспериментальных исследований в работе.

ТЕПЛООБМЕН НА КАНАЛЬНЫХ СТРУКТУРАХ ТЕПЛОВЫХ ТРУБ

Технологические аппараты, как правило, допускают вертикальную ориентацию ТПУ с расположением зоны подвода тепла внизу. Производительность и габариты аппаратов предполагают использование термосифонов и гравитационных ТТ. Последние предпочтительней при плотностях тепловых потоков до 10^4 Вт/м². В гравитационных ТТ нивелируются основные достоинства сеточных, спеченных и волокнистых структур и поэтому более технологичными, дешевыми и эффективными оказываются каналные капиллярные структуры. Вместе с тем, результаты экспериментальных исследований в канавках авторами трактуются по-разному. Нет даже общей точки зрения на возможные режимы теплоотдачи и границы перехода от одного режима к другому.

В ОТИПП поставлены комплексные исследования, которые показали, что в каналных структурах возможны три режима парообразования: испарительный, испарительно-пульсационный и кипение. Проявление и сосуществование этих режимов определяются, в основном, уровнем тепловых потоков, видом теплоносителя, геометрией поверхности.

В безартериальных тепловых трубах с протяженным транспортным участком располагаемый капиллярный напор, формирующийся на участке подвода тепла, используется преимущественно на транспорт жидкости. В таких условиях осуществляются устойчивые режимы испарения с поверхности раздела вплоть до тепловых потоков, при которых нарушается гидродинамический предел работы капиллярной структуры. Закономерности теплоотдачи в таких условиях в широком диапазоне режимных (q , P_n), геометрических (h/s , δ/s , α) и физических параметров (λ_m/λ_j) изучались методом ЭТА. Термическое сопротивление канала представлялось суммой последовательно соединенных термических сопротивлений металлического основания, смоченного канала и слоя жидкости. Обработка данных проводилась с помощью модели, в которой перенос тепла через смоченную канавку осуществлялся теплопроводностью через ребро соответствующего профиля с переменным коэффициентом теплоотдачи. В результате моделирования получены обобщающие зависимости, а

для конкретных сочетаний конструкционного материала и теплоносителя получены простые аппроксимации. Например, для прямоугольного канала:

$$\alpha = \frac{\lambda_{ж}}{h} \frac{s}{b} \left[1 + C_1 \left(\frac{h}{s} \sqrt{\frac{b}{s}} \right)^m \right] \exp \left(0,58 \frac{s}{r} \sqrt{\frac{s}{h}} \right). \quad (15)$$

Значения C_1 и m для ряда расчетных пар приведены в таблице I.

Таблица I

Характеристики режимов парообразования

Расчетная пара		Испарительный		Испарительно-пульсационный	К и п е н и е	
		C_1	m	$\alpha, \text{Вт/м}^2\text{К}$	$q_{ж}, \text{Вт/м}^2$	A
Нержавеющая сталь	вода	1,58	1,64	3900	35000	4,4
	этанол			2200	23000	3,17
	аммиак	1,58	1,64			
М е д ь	вода			11000	58000	8,16
	этанол			4500	33000	4,8
	ацетон			4600	33000	4,9
	Р-113			2400	24000	3,0
Дюралюминий	ацетон	1,59	1,47			
	этанол	1,59	1,47	4300	33000	4,81
	аммиак	2,6	1,5			
	вода	2,6	1,5	8500	56000	6,75

С ростом теплового потока увеличиваются кривизна мениска r и коэффициент α , максимальное значение которого соответствует вписанному мениску ($r = 0,5S$). Дальнейшее заглубление мениска приводит к осушению поверхности и к снижению α . Для расчета r требуется совместное рассмотрение уравнения (15) с гидродинамическим уравнением ТТ. Сопоставление результатов таких расчетов с данными опытов подтвердило корректность тепловых моделей испарительного режима.

В опытах на коротких участках артериально-канальных структур испарительный режим парообразования нарушался уже при достаточно низких тепловых потоках ($q < 10^4 \text{Вт/м}^2$). Возникал режим парообразования, о существовании которого ранее не упоминалось. На основании визуальных наблюдений он назван испарительно-пульсационным. В полностью заполненном жидкостью канале радиус мениска $r_1 \rightarrow \infty$, а предполагаемый капиллярный напор $\zeta/r_1 \rightarrow 0$. При испарении жидкости мениск заглубляется ($r_2 < r_1$) и поверхность частично осушается, но капиллярный напор ещё меньше гидравлического сопротивления (ΔP) в

зоне контакта "артерия-канал". Процесс испарения продолжается вплоть до почти полного высыхания. Когда значение капиллярного напора превысит величину ΔP , начинается истечение жидкости из артерии. Поскольку сопротивление канала меньше величины ΔP , жидкость как бы "выстреливает" и быстро заполняет канал. Такие режимы оказались устойчивыми и хорошо воспроизводимыми. Для них характерна автомодельность α при изменении плотности теплового потока вплоть до наступления пузырькового кипения (табл. I).

Приближенная физическая модель испарительно-пульсационного режима, основанная на визуальных наблюдениях, сформулирована как модель двухстадийного процесса. Первая стадия - осушение канала при относительно слабом влиянии подпитки

$$q_b = r \rho_{*} \frac{df_{*}}{d\tau} - \rho_{*} c_{*} f_{*} \frac{1}{2} \frac{dV_{*}}{d\tau} \quad (15)$$

Для стадии осушения $Fo > 10$, т.е. температурное поле в системе "канавчатая поверхность - слой испаряющейся жидкости" можно считать квазииспарительным. Во второй стадии движущий капиллярный потенциал формируется заглубленным мениском, а сопротивление движению определяется условиями течения в затопленном канале. При известной длине участка l характерное время осушения (τ_1) и заполнения (τ_2) определяется

$$\tau_1 = \frac{f_{max} r \rho_{*}}{q_b}, \quad \tau_2 = \frac{d_{*}^2 l_{*}}{8} \left(\frac{l}{d_{*}} \right)^2 c_2 \quad (17)$$

Если за время $\tau_1 + \tau_2$ тепловой поток окажется достаточным, чтобы обеспечить перегрев стенки выше температуры метастабильного состояния, то в этом случае такой режим будет сопровождаться постепенным осушением поверхности теплообмена.

Визуальное изучение парообразования в каналах подтвердило, что переход от испарительного режима к пузырьковому кипению соответствует характерному излому на кривой кипения. Опыты отмечают существенное смещение кривой кипения в сторону меньших перегревов по сравнению с кипением в большом объеме и на подобных сетках. Значение α в испарительно-пульсационном режиме определяется, главным образом, родом теплоносителя, давлением, материалом поверхности:

$$\alpha = 160 \left(\frac{\lambda_{*}^2}{\sqrt{\lambda_{*} \delta T_{*}}} \right)^{0.4} \left(\frac{\rho_{*}}{\rho_{*} - \rho_{*}} \right)^{0.3} \left(\frac{\lambda_{*}}{\lambda_{*}} \right)^{0.25} \quad (18)$$

Уравнение с точностью $\pm 25\%$ описывает экспериментальные точки ОТИП и литературные данные, полученные на стальных, медных, алюминиевых поверхностях при испарении воды, этанола, хладонов R-12, R-22, R-113, аммиака, ацетона. Для условий работы низкотемпературных

ТТ при $5 \cdot 10^3 \leq q \leq q_k$ надежные результаты дает соотношение

$$\alpha = 5 \cdot 10^3 \lambda_{ж}^{0,55} \lambda_m^{0,15} \quad (19)$$

Если $q > q_k$, интенсивность теплоотдачи выше, чем при испарительно-пульсационном режиме, что связано с развитием узырькового кипения.

Для инженерных расчетов рекомендуется эмпирическое соотношение

$$\alpha = A q^{2/3} \quad (A \text{ определяется по табл. I}).$$

Для условий работы ТТ с погрешностью не более 14% плотность теплового потока, соответствующую началу кипения, можно определить из уравнения:

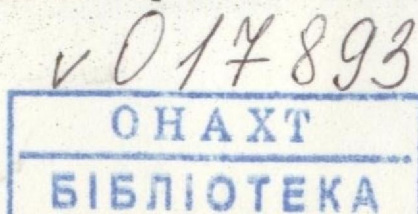
$$q_k = 21,3 \cdot 10^3 \lambda_{ж}^{0,4} \lambda_m^{0,2} \quad (20)$$

При конденсации на профилированных поверхностях условием удержания жидкости в канавках будет: $hS \leq 2\sigma/(\rho_{ж} g)$. Как правило, для канальных ТТ $hS \leq 10^{-5} \text{ м}^2$, т.е. конденсация и стекание плёнки конденсата будет происходить на поверхности, представляющей чередование участков металлических ребер с участками, заполненными жидкостью. При такой модели термическое сопротивление процессу конденсации можно определить по схеме $R_k^{-1} = \alpha_k \frac{S}{\delta} + \alpha'_k \frac{h-S}{\delta}$, где α_k рассчитывается по формуле Нуссельта, а α'_k - по соотношению (15).

ТЕПЛООБМЕН В ЗОНЕ КОНТАКТА ТПУ И АППАРАТА

В некоторых аппаратах автономность ТПУ может в полной мере проявиться только при обеспечении оперативного, простого и надежного подключения ТПУ к теплообменным поверхностям. Возникает новая для пищевых аппаратов задача конструирования эффективного теплового разъединителя. Эта задача специфична и для теории контактной теплопередачи, поскольку конструкция готовой ТА не допускает механическую доводку поверхности после её изготовления, ограничиваются и допустимые силовые воздействия в зоне контакта. Таким образом, определяющим может оказаться не только микрорельеф, но и макросостояние поверхности, её неплоскостность. Проблема усугубляется тем, что поверхность аппарата периодически сопрягается с различными ТПУ. Большое количество подключений требует ресурсных испытаний тепловых разъёмов.

Контактная теплопередача изучалась аналитически, экспериментально и электро моделированием. Методами ЭТД получены картины линий теплового потока в зоне контакта, определена приповерхностная область с искаженным температурным полем в зависимости от микро- и макрорельефа контактирующих пар. Результаты электро моделирования позволили представить модель контактного слоя с учетом его объёмнопористой структуры при различных тепловых проводимостях твердых фаз и межконтактной



среды. Поскольку неоднородность структуры контактного слоя является результатом случайной шероховатости сопрягаемых поверхностей, то теплопроводность контактного слоя выражена суммой математического ожидания и флуктуаций $\langle \lambda_k \rangle = \langle \lambda \rangle + \tilde{\lambda}(z)$.

Для оценки $\langle \lambda \rangle$ рекомендуется преобразованная формула В.И.Оде-левского, а общее термическое сопротивление разъема рассчитывается по параллельной схеме

$$\frac{1}{R_k} = \frac{\langle \lambda_k \rangle \psi_k}{(h_1 + h_2)(1 - \epsilon_k)} + \lambda_c \left[\frac{2}{3} h_0 + (h_1 + h_2)(1 - \epsilon_k) \right]^{-1}, \quad (21)$$

где второе слагаемое определяет термическое сопротивление зазора с учетом кинетики деформирования при различных силовых и тепловых нагрузках. Относительные деформации (ϵ_k) и площадь контакта (ψ_k) получены на основе положений теории Герца.

Таким образом, расчет контактного сопротивления ведется с учетом стохастической структуры зазора на основе трехкомпонентной модели, учитывающей теплофизические свойства металла ТТ (λ_{m1}), аппарата (λ_{m2}) и среды, заполняющей зазор (λ_c), начальной неплоскостности (h_0) и микровыступов (h_1, h_2). В работе показано удовлетворительное согласование аналитических методов и электро моделирования с результатами испытаний тепловых разъемов.

Ресурсные испытания тепловых разъединителей при $T > 25 \cdot 10^3$ часов показали, что теплопроводные кремнийорганические заполнители типа КИТ-8 практически не ухудшают проводимости зазоров в процессе длительной эксплуатации и, если позволяет технология, могут рекомендоваться как стабильные и эффективные заполнители.

ТЕПЛОБМЕН ПРИ ОБТЕКАНИИ СЛОЕМ ЗЕРНА ПОВЕРХНОСТЕЙ ТПУ

Отсутствие в литературе рекомендаций по расчету интенсивности теплоотдачи при обтекании слоем зерна поверхности, предопределило необходимость в постановке таких исследований. Для визуализации перемещения зерна использовался метод "меченного слоя", благодаря чему получены картины обтекания одиночных ТТ и их пучков и эпюры локальных скоростей в зависимости от диаметров ТТ и скорости слоя. Анализ результатов опытов по механике движения показал, что относительная зона влияния ТПУ увеличивается с уменьшением диаметра ТТ, скорость слоя влияет меньше. Установлено, что локальные значения скоростей, степеней торможения слоя и приведенных плотностей слоя не совпадают по угловой координате, что не позволяет однозначно определить качественный характер локальной теплоотдачи на цилиндрической поверхности. Исследования локальной теплоотдачи показали, что

α существенно изменяется по окружности ТТ, а максимум α приходится на угол 45° по ходу движения зерна. Средняя теплоотдача с ростом диаметра трубы растет до определенной величины, а затем монотонно убывает. При этом симплекс (d_T/d_3) , соответствующий α_{\max} изменяется от 4,5 при $U = 2 \text{ мм/с}$ до 7 при $U = 24 \text{ мм/с}$. При условиях $(d_T/d_3 > 8)$ в лобовой части ТТ образуется застойный слой, стабильность которого зависит от скорости потока. Для пшеницы с влажностью до 15% экспериментальные данные по теплообмену обобщены зависимостью:

$$Nu = 0,98 Pe^{0,18} \left(\frac{d_T}{d_3} \right)^{0,77} \left(\frac{S_1 S_2}{d_T^2} \right)^{-0,18} \quad (22)$$

при $100 < Pe < 15000$ и диапазонах относительных поперечного $0,7 \leq (S_1/d_T) \leq 3$ и продольного $1,2 \leq (S_2/d_T) \leq 1,7$ шагов.

При коридорной компоновке пучков интенсивность теплоотдачи снижается на 10...12%. Для плоских ТЛУ α не зависит от высоты поверхности ряда ТТ и шага между ними. При использовании в качестве определяющего размера толщины ТЛУ экспериментальные точки обобщаются зависимостью $Nu = 2,1 Pe^{0,13}$.

МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ ТЛУ И АППАРАТОВ НА ИХ ОСНОВЕ

Процедура комплексной оптимизации параметров ТЛУ, как элементов аппарата, должна включать решение двух основных задач: оптимизацию параметров капиллярной структуры ТТ по минимуму полного термического сопротивления ТТ, при фиксированных внешних размерах, и оптимизацию ТТ в составе аппарата с определением внешних независимых конструктивных и режимных параметров. Первая задача имеет самостоятельное значение и её решение для канальных ТТ не известно. Целью расчетов является поиск параметров структуры $(S, h/s, b/s, \angle \gamma)$ при минимальных значениях целевой функции. Теплогидродинамическая оптимизация проводилась при совместном рассмотрении уравнения типа (15) и гидродинамического уравнения ТТ при допущениях, что в каналах испарительный режим при ламинарном течении, а минимальный радиус кривизны для прямоугольных каналов соответствует условиям вписанного мениска. Решение, например, для системы "нержавеющая сталь-вода" дает $\angle_{\text{опт}} \approx 30^\circ$. Инженерная методика расчета R_T канальных структур представлена в виде Фортран-программы и реализована на ЕС-1022 для ТТ, работающих на воде, аммиаке и хладоне R-22.

В работе представлены методики теплового конструктивного расчета теплообменников системы "газ-ТЛУ-зерно" и методика комплексной оптимизации аппаратов с ТЛУ. Алгоритм оптимизации включает расчет

ТТ, гидравлики системы, массы элементов и подпрограмму оптимизации. Математическая постановка задачи заключалась в поиске экстремума целевой функции методом Гаусса-Зайделя. Процедура оптимизации осуществлялась гравильно как в тех случаях, когда существовал математический оптимум (скорость жидкости в конденсаторе, диаметры трубопроводов), так и тогда, когда этот оптимум лежал за границами конструктивных ограничений. Реализация программы оптимизации позволила предложить коэффициентный метод инженерного расчета оптимальных параметров аппаратов с ТПУ. Исходными данными для расчета являются: тепловой поток, температура жидкости в конденсаторе и его длина, расстояние до насоса и $t_{ц}$. С помощью системы графиков определяются коэффициенты, позволяющие легко найти оптимальные значения числа ТТ, расхода жидкости и мощности на её перекачку.

МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛОВЫХ ТРУБ

Внедрение ТПУ связано с разработкой методов оценки их ресурсных характеристик. Теплогидродинамическая надежность ТТ определяется её термическим сопротивлением. По характеру необратимых физико-химических изменений, по особенностям работы ТТ можно отнести к классу объектов с постепенными отказами, характеризующимися "старением". Для таких объектов методология математических методов прогнозирования позволяет определить характер протекания процессов в будущем на основе найденных экстраполяционных связей с информацией о процессе в контролируемый промежуток времени.

В процессе длительной эксплуатации ТТ наблюдаются два режима. Первый, длительность которого не более 1000 часов, - приработка поверхности. В это время происходит дегазация поверхности и теплоносителя, улучшается смачиваемость, поверхность очищается. В зависимости от того, какой из этих факторов для конкретной ТТ имеет большую значимость, процесс приработки может сопровождаться как ростом, так и снижением R_T . Второй - режим "регулярного старения". Из анализа исключен режим катастрофического отказа, резкий рост R_T в котором является следствием недопустимых температурных или других воздействий, приводящих к разложению теплоносителя и ингибитора.

Прогнозирующая модель построена для второго режима из условий линейности роста во времени R_T в процессе "старения". Обработка известных данных по ресурсу ТТ в виде $R_T/R_0 = f(\tau)$ в пределах эксплуатации до $40 \cdot 10^3$ часов доказывает, что скорости роста R_T практически постоянны. Вместе с тем для различных технологий и конструкции

эти скорости различны. На этом основании проведена обработка всех известных данных по ресурсным испытаниям ТТ в форме

$$\frac{R(\tau)}{R_0} = 1 + \frac{\Delta R}{R_0 \Delta \tau} \tau \quad (23)$$

Интервальная оценка скорости роста R_T получена при обработке данных на ЭВМ. Все известные экспериментальные данные по ресурсу ТТ (изготовленных за рубежом и в СССР из стали и дюралюминия, работающих на аммиаке и воде) с помощью модели (23) удачно трансформируются на обобщенную "кривую старения". На основе этой модели предлагается методика прогнозирования ресурсных характеристик ТТ с ограничением $(R(\tau)/R_0) < 3$. После приработки ТТ ($\tau = 1000$ часов) измеряется с интервалом (50...100) часов 15...20 значений $R(\tau)$. Определяется темп "старения" и из соотношения (23) при подстановке предельного значения $R(\tau)$ рассчитывается время эксплуатации ТТ.

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ЦИКЛЫ И СХЕМЫ НОВЫХ ВИДОВ ТПУ

Совершенствование теплотехнологии, разработка энергосберегающих схем связаны с расширением функциональных возможностей ТПУ. Новые способы работы ТПУ, оригинальные конструктивные решения могут значительно изменить существующие теплотехнические схемы. В работе приведено описание новых конструкций ТПУ: тепловых реле, тепловых триодов, многопозиционных тепловых регуляторов.

Особый интерес представляет новый класс ТПУ - холодильные трубы. В работе на основе гидродинамического анализа обоснована возможность реализации теплоиспользующих холодильных циклов при перекачке конденсата автономными средствами, использующими силы поверхностного натяжения, инерции, осмоса, эффект "теплого удара" и т.п. В результате показаны новые возможности организации эжекторных холодильных циклов: биагентный и эжекторно-осмотический, которые реализованы в конструкциях ротационной, фитильной и осмотической ХТ. Предложены и новые принципы организации абсорбционных диффузионных циклов: электрогазодинамический и эжекторный, реализованные в конструкциях ХТ. Разработан абсорбционно-осмотический цикл и конструкция ХТ, использующая способность некоторых жидкостей поглощать тепло при их смешивании.

Все предложенные конструкции отличает автономность, возможность работы на низкопотенциальных источниках тепла. Это надежные, бесшумные генераторы холода большого ресурса. Область применения ХТ - холодильники и кондиционеры транспортных средств, утилизирующие тепло выхлопных газов, автономные гелиохолодильники, обеспечивающие сохранность продуктов в полевых условиях.

ПРОМЫШЛЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Трудоёмкость внедрения всего спектра задач (рис.1) различная. Поэтому на I-ом этапе внедрения ТПУ в теплотехнологию АПК выделены задачи, которые традиционны по своей сути для ТПУ и не требуют коренной переделки действующих схем и оборудования. Это технология интенсивного охлаждения мясных туш и утилизация тепла. Второй этап охватывает перспективные задачи, имеющие теплотехнические и экологические преимущества, повышающие качество продукта, но требующие существенной модернизации действующего оборудования, а, иногда, и пересмотра сложившихся традиций в конструировании и эксплуатации как технологического оборудования, так и ТПУ. К таким задачам отнесены криоконцентрирование и кондуктивная сушка зерна с ТПУ.

Испытания технологии охлаждения полутуш с МИГ, проведенные на Одесском и Тростянецком мясокомбинатах, показали, что применение МИГ устраняет температурный пик в центре туши. Неравномерность температур при этом снижается на 30...50%. Локальное воздействие с помощью МИГ устраняет "термический центр", в результате время охлаждения сокращается на 30%. На одну полутушу требуется 3...5 МИГ, которые вводятся в "термический центр" (рис.2б) с шагом 50...60мм. Иглы входят в мясо легко, без особых усилий, а после охлаждения свободно удаляются. Место, в котором они находились, мгновенно затягивается, не оставляя следов, товарный вид продукта не ухудшается. Увеличение обсемененности мяса микроорганизмами не обнаружено.

Автором разработана номограмма для расчета теплопередачи с помощью МИГ и типоразмерный ряд МИГ в зависимости от вида мяса и условий охлаждения в камере. Для промышленного внедрения способа в научных подразделениях АПК разрабатывается технологическая инструкция по санитарно-гигиеническим нормам применения МИГ.

С помощью термосифонов-криоконцентраторов достигается практически безотходная технология концентрирования пищевых жидкостей. На всей поверхности испарителя одновременно образуется "затравка", а ледяной блок растёт с плотной упаковкой кристаллов. Благодаря рациональной организации процесса теплопередачи сводятся к минимальным потери сухих веществ в капиллярах слоя льда. При сгущении цельного молока до концентрации 32% в вымороженной фракции обнаружены только следы белка. Некоторые результаты криоконцентрирования приведены в таблице 2.

Таблица 2

Результаты криоконцентрирования творожной сыворотки

Параметр	: Единицы : : измере- : : ния :	: Исходный : : продукт :	: Выморожен- : : ная фракция :	: Концентрат
Плотность	кг/м ³	1024	930,4	1138
Кислотность	° Т	75	4,0	360
С О М О	%	5,35	0,19	37
Лактоза	%			26,6

При концентрировании сыворотки лактоза кристаллизовалась и выпадала в осадок. Исключение из технологии операции сепарирования снижает на 10% энергопотребление по сравнению с существующими технологиями криоконцентрирования. Схема может работать с использованием морозного воздуха. Тогда расходы энергии связаны только с вентилированием воздуха и снижаются до 0,2 руб. на 1 т удаляемой влаги. Таким образом, технология монолитной кристаллизации на поверхности ТПУ позволяет снизить энергозатраты и уменьшить потери сухих веществ.

Эффективная утилизация тепловых стоков является межотраслевой проблемой. В пищевой технологии наиболее актуальна эта проблема в сушильной технике. Автором предложен ряд схем, улучшающих теплотехнологию сушки за счет рационального использования преимуществ ТПУ. Это разомкнутый воздушный теплонасосный цикл с термосифонным воздухоподогревателем, регенератор с ТПУ для сыпучих продуктов. Использование теплообменника с ТТ для обезвреживания отработанного агента сушки и для подогрева воздуха за счет тепла агента позволяет реализовать в зерносушении рациональные схемы рециркуляции теплоносителя. Эффективность таких схем в значительной степени определяется интенсивностью теплопередачи в теплообменнике. Проведены производственные испытания модуля воздухоподогревателя с гравитационными ТТ, имеющими спиральное оребрение. Высота ТТ - 2 м, их количество в модуле - 200 шт. Стендовые испытания проведены на аппаратах с гладкими ТТ плоской формы. Во всех аппаратах коэффициент теплопередачи достигал (100...150) Вт/м²К при скоростях холодного и горячего потоков до 6 м/с. Результаты опытов хорошо обобщаются в координатах: $(kF)/W_r = f(W_r/W_k)$. Модуль теплообменника-утилизатора с ТТ работает в составе зерносушильной установки ДСП-32А на Тернопольском комбинате хлебопродуктов. ТТ установлены с наклоном 7° к горизонту, что обеспечивает возврат жидкости в испарители ТТ и облегчает эвакуацию конденсата и загрязнений из межреберного пространства. Регистрация температур стенок ТТ позволила оценить по порядку величин термическое сопротивление слоя загрязнений.

К концу заготовительной кампании без чистки аппарата величина R на первых трёх рядах ТТ не превышала $8 \cdot 10^{-3} \text{ Км}^2/\text{Вт}$. На последующих рядах пыль смывалась конденсатом.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ, НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Впервые предложена классификация процессов термообработки пищевых продуктов, которая определила широкие перспективы внедрения ТПУ в теплотехнологии АПК. Многообразие и специфика прикладных задач выдвигают актуальную проблему создания основ теории и практики применения ТПУ в процессах и аппаратах пищевых производств и характеризуют выполненное исследование как новое перспективное научно-техническое направление.

2. Разнообразные задачи термообработки пищевых продуктов с помощью ТПУ можно свести к трём теплофизическим моделям:

- нестационарной теплопроводности массива при наличии внутренних стоков (источников) тепла в виде ТПУ;

- кристаллизации на поверхности ТПУ с подвижной границей льдообразования;

- дискретной двухкомпонентной системы "газ-продукт", описывающей взаимосвязанный тепломассоперенос при подводе тепла от газа и от поверхности ТПУ.

Математические модели основаны на системе дифференциальных уравнений, описывающих сопряженные процессы тепломассопереноса в продукте, в ТПУ и на границах "ТПУ-продукт", "ТПУ-среда" (узел аппарата). Приближенные аналитические зависимости позволяют найти основные характеристики процессов (распределение температур в массиве, зону влияния ТПУ), оценить качественно и количественно влияние на них режимных параметров, количества и характеристик ТПУ. Из анализа математических моделей определены задачи экспериментальных исследований в ТПУ и на границе "ТПУ-продукт", "ТПУ-конструктивный элемент аппарата".

3. Гидродинамический анализ определил перспективные типы ТПУ в теплотехнологиях АПК: каналные гравитационные тепловые трубы и термосифоны. При исследовании в открытых капиллярных каналах впервые установлены три режима парообразования: испарительный, испарительно-пульсационный и кипение. Испарительный режим характерен для безартериальных структур при стабилизированном ламинарном течении в них жидкости. Специфика теплообмена в этих условиях определяется сопряженным характером процесса теплопроводности в системе "плёнка-стенка".

Впервые на основе гидродинамического анализа взаимодействия артерии и капиллярного канала объяснены и установлены границы существования испарительно-пульсационного режима, в котором периодическое поступление жидкости в канал приводит к пульсациям температур стенки, но не вызывает полного осушения канала, и, как следствие, в таких испарителях с ростом теплового потока интенсивность теплообмена постоянно возрастает вплоть до запаривания структуры. Для расчета интенсивности теплоотдачи рекомендуются соотношения (15...20). Термическое сопротивление процессу конденсации пара на канальных поверхностях можно представить как сумму включенных по параллельной схеме термических сопротивлений процессов конденсации на ребрах каналов (используется уравнение Нуссельта) и на залитых жидкостью каналах (используется соотношение (15)).

4. Ресурсная модель низкотемпературной тепловой трубы из совместимых материалов, температурные режимы которой исключают вероятность резкого роста термического сопротивления (например, из-за разложения ингибитора), может быть представлена из двух последующих этапов. Первый (длится до 1000ч) - режим приработки. На втором этапе имеет место "регулярное старение" ТТ. Прогнозирующая модель (23) для второго этапа позволила обобщить известные ресурсные характеристики низкотемпературных ТТ и дает возможность по результатам непродолжительных испытаний (до 3000ч) предсказать значение термического сопротивления и срок безотказной работы ТТ.

5. Условия сопряжения ТПУ с поверхностью аппарата (количество включений, размеры поверхностей контакта, периодическое подключение к источнику различных ТПУ, уровень допустимых усилий в зоне контакта и т.п.) требуют при моделировании контактной теплопередачи учитывать сложную объёмно-пористую структуру контактного слоя. Расчетная модель (21) учитывает упругую деформацию и неплоскостность в зоне сопряжения.

6. Впервые получены и обобщены экспериментальные данные по теплообмену плотного непродуваемого слоя зерна с поверхностью цилиндрических и плоских тепловых труб. С ростом d_1/d_2 интенсивность теплоотдачи возрастает, но при условии $d_1/d_2 > 8$ в лобовой части ТТ образуется застойная зона и величина α начинает монотонно убывать. Для расчета коэффициента теплоотдачи рекомендуется соотношение (22).

7. На основе гидродинамического подхода показана возможность реализации в ТПУ абсорбционных и пароэжекторных холодильных циклов с применением фитильных, инерционных, осмотических, электродинамических перекачивающих устройств. Предложен и исследован ряд конструкций нового класса тепловых труб - холодильных труб, которые отличаются новизной организации холодильного цикла. Разработаны специальные виды ТПУ - осмотическая, ТТ - теплосой триод, ТТ - тепловой насос, ТТ - позиционный регулятор температуры.

8. Совокупность результатов, научных положений, обобщений, методов расчета и технических решений составили основы теории и практики применения ТПУ в теплотехнологиях пищевых и перерабатывающих производств. Производственные испытания разработок показали высокую эффективность технологий, аппаратов и систем на основе ТПУ:

- применение ТПУ при охлаждении мясных туш на 30...50% уменьшает неравномерность температур в объеме продукта, на 30% сокращает время термообработки, снижает усушку, расходы электроэнергии, хладагента, повышает сборачиваемость холодильных камер;

- использование ТПУ в качестве криоконцентраторов обеспечивает малостходную и энергосберегающую технологию; при концентрировании соков и молочных продуктов до 40% сухих веществ потери продукта не превышают 0,3%;

- разработанный теплообменник-утилизатор с ТТ снижает расход топлива на одной зерносушилке ДСН-32А на сумму 2,99 тыс. рублей в месяц, повышает экологическую чистоту предприятий.

О Б О З Н А Ч Е Н И Я

α - коэффициент теплоотдачи; β - коэффициент массообмена; γ - половина угла при вершине треугольной канавки; δ - толщина; ϑ - избыточная температура; Λ - скрытая теплота льдообразования; Λ - коэффициент теплоспроводности; ν - кинематический коэффициент вязкости; ρ - плотность; σ - коэффициент поверхностного натяжения; τ - время; α - коэффициент температуропроводности; ϑ - шаг; D - коэффициент диффузии; d - диаметр; F - площадь поверхности; f - живое сечение; h - глубина, высота, шероховатость; M - массовый расход; P - давление; Q - тепловой поток; q - плотность теплового потока; c_p - удельная теплоемкость при постоянном давлении; R - термическое сопротивление; r - радиус, скрытая теплота парообразования; S - ширина; t - температура; V - объем; v - скорость; W - водяной эквивалент; X - концентрация; Z - координаты

ната; Bi - число Био; Fo - число Фурье; Nu - число Нуссельта; Re - число Пекле; МИГ - морозильная игла; ТПУ - автономное теп-
лопередающее устройство; ТТ - тепловая труба; ХТ - холодильная
труба; ЭТА - электротепловая аналогия; g - горячий поток; $ж$ - жид-
кость; $з$ - зерно; $и$ - испарение; $к$ - конденсация; $л$ - лед; $м$ - ме-
талл; $н$ - насыщение; $о$ - начальный; $п$ - пар, продукт; $с$ - охлаждаю-
щая среда; $т$ - тепловой трубы; $х$ - холодный поток; $э$ - эквивалент-
ный; $я$ - ячейка сетки.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. А.с.567922 (СССР). Вибросушилка для мелкодисперсных мате-и-
алов / Одес.технол.ин-т пищ.пром-сти им. М.В.Ломоносова; В.Ф.Чайков-
ский, В.В.Корнараки, О.Г.Бурдо. - № 2348688/06. Заяв. 15.04.76, опубл. в
Б.И., 1977, № 29.
2. А.с.634737 (СССР). Тепловая труба / Одес.технол.ин-т пищ.пром-
сти им. М.В.Ломоносова; В.Ф.Чайковский, Г.Ф.Смирнов, О.Г.Бурдо. -
№ 2368365/29-06. Заяв. 07.06.76, опубл. в Б.И., 1979, № 3.
3. А.с.659862 (СССР). Вибросушилка для мелкодисперсных мате-и-
алов / Одес.технол.ин-т пищ.пром-сти им. М.В.Ломоносова; В.В.Корнара-
ки, О.Г.Бурдо. - № 2563401/24-06. Заяв. 30.12.77, опубл. в Б.И., 1979, № 16.
4. А.с.672472 (СССР). Пульсирующая тепловая труба / Одес.технол.
ин-т пищ.пром-сти им. М.В.Ломоносова; В.Ф.Чайковский, Г.Ф.Смирнов, О.Г.
Бурдо. - № 2563850/29-06. Заяв. 30.12.77, опубл. в Б.И., 1979, № 25.
5. А.с.720282 (СССР). Тепловая труба / Одес.технол.ин-т пищ.пром-
сти им. М.В.Ломоносова; В.Ф.Чайковский, Г.Ф.Смирнов, О.Г.Бурдо, З.Ш.Се-
мерханов. - № 2646282/24-06. Заяв. 06.07.78, опубл. в Б.И., 1980, № 9.
6. А.с.726410 (СССР). Тепловая труба / Одес.технол.ин-т пищ.
пром-сти им. М.В.Ломоносова; В.Ф.Чайковский, Г.Ф.Смирнов, О.Г.Бурдо. -
№ 2560664/29-06. Заяв. 28.12.77, опубл. в Б.И., 1980, № 13.
7. А.с.726906 (СССР). Сорбционная холодильная установка /
Одес.технол.ин-т пищ.пром-сти им. М.В.Ломоносова; О.Г.Бурдо. -
№ 2672805/23-06. Заяв. 10.10.78. (ДСП).
8. А.с.730047 (СССР). Абсорбционная холодильная установка /
Одес.технол.ин-т пищ.пром-сти им. М.В.Ломоносова; О.Г.Бурдо, Г.Ф.
Смирнов. - № 2683413/23-06. Заяв. 09.11.77. (ДСП).
9. А.с.731260 (СССР). Центробежная тепловая труба / Одес.технол.
ин-т пищ.пром-сти им. М.В.Ломоносова; О.Г.Бурдо, В.Г.Висневский. -
№ 2658345/24-06. Заяв. 15.08.78, опубл. в Б.И., 1980, № 16.
10. А.с.769287 (СССР). Тепловая труба / Одес.технол.ин-т пищ.

пром-сти им. М.В. Ломоносова; В.Ф. Чайковский, Г.Ф. Смирнов, О.Г. Бурдо, З.Ш. Семерханов. - № 2627512/24-06. Заяв. 12.06.78. (ДСП).

11. А.с.823795 (СССР). Вибросушилка для мелкодисперсных материалов /Одес.технол.ин-т пищ.пром-сти им. М.В. Ломоносова; В.В. Корнарики, О.Г. Бурдо. - № 2794316/24-06. Заяв. 09.07.79, опубл. в Б.И., 1981, №15

12. А.с.846937 (СССР). Пароэжекторная холодильная биагентная установка /Одес.технол.ин-т пищ.пром-сти им.М.В. Ломоносова; В.Ф. Чайковский, О.Г. Бурдо. - № 2669919/23-06. Заяв. 03.10.78, опубл. в Б.И., 1981, № 26.

13. А.с.858415 (СССР). Тепловая труба /Одес.технол.ин-т пищ.пром-сти им.М.В. Ломоносова; О.Г. Бурдо, Г.Ф. Смирнов, З.Ш. Семерханов. - № 2683689/24-06. Заяв. 09.11.78. (ДСП).

14. А.с.892147 (СССР). Абсорбционная холодильная установка /Одес.технол.ин-т пищ.пром-сти им.М.В. Ломоносова; В.Ф. Чайковский, О.Г. Бурдо. - № 2903724/23-06. Заяв. 01.04.80, опубл. в Б.И., 1981, № 47.

15. А.с.896365 (СССР). Центробежная тепловая труба /Одес.технол.ин-т пищ.пром-сти им.М.В. Ломоносова; О.Г. Бурдо. - № 2777519/24-06. Заяв. 07.06.79, опубл. в Б.И., 1982, № 1.

16. А.с.926457 (СССР). Абсорбционный диффузионный холодильный агрегат /Одес.технол.ин-т пищ.пром-сти им.М.В. Ломоносова; О.Г. Бурдо, Г.Ф. Смирнов, - № 2861717/23-06. Заяв. 02.01.80, опубл. в Б.И., 1982, № 17.

17. А.с.941836 (СССР). Тепловая труба /Одес.технол.ин-т пищ.пром-сти им.М.В. Ломоносова; В.Ф. Чайковский, О.Г. Бурдо, Г.Ф. Смирнов. - № 2948448/24-06. Заяв. 01.07.80, опубл. в Б.И., 1982, № 25.

18. А.с.964378 (СССР). Способ получения холода и тепловая труба /Одес.технол.ин-т пищ.пром-сти им.М.В. Ломоносова; Г.Ф. Смирнов, О.Г. Бурдо. - № 2861718/24-06. Заяв. 02.01.80, опубл. в Б.И., 1982, № 37.

19. А.с.1079996 (СССР). Тепловая труба /Одес.технол.ин-т пищ.пром-сти им.М.В. Ломоносова; О.Г. Бурдо, О.Б. Биньковский, А.С. Титлов. - № 3507857/24-06. Заяв. 03.11.82, опубл. в Б.И., 1984, № 10.

20. А.с.1101640 (СССР). Способ тепловой обработки зерна /Одес.технол.ин-т пищ.пром-сти им.М.В. Ломоносова; В.Ф. Чайковский, О.Г. Бурдо, Е.В. Семенюк. - № 3568416/24-06. Заяв. 09.02.83, опубл. в Б.И., 1984, №25.

21. А.с.1171091 (СССР). Установка для пропаривания зерна крупных культур /Одес.технол.ин-т пищ.пром-сти им.М.В. Ломоносова; В.Д. Каминский, О.Г. Бурдо, Н.В. Остапчук, Н.Т. Монашко. - № 3458127/28-13. Заяв. 28.06.82, опубл. в Б.И., 1985, № 24.

22. А.с.1326867 (СССР). Лоская тепловая труба /Одес.технол.

ин-т пищ.пром-сти им. М.В.Ломоносова; Б.А.Афанасьев, О.Г.Бурдо, В.З.Лосев и др. - № 3970244/24-06. Заяв. 30.10.85, опубл. в Б.И., 1987, №28.

23. А.с.1333998 (СССР). Способ работы абсорбиционно-диффузионной холодильной машины /Одес.технол.ин-т пищ.пром-сти им.М.В.Ломоносова; В.Ф.Чайковский, Г.Ф.Смирнов, О.Г.Бурдо, А.С.Титлов. - № 3893251/24-06. Заяв. 12.03.85, опубл. в Б.И., 1987, № 32.

24. А.с.1343228 (СССР). Способ работы тепловой трубы на бинарной смеси /Одес.технол.ин-т пищ.пром-сти им.М.В.Ломоносова; В.Ф.Чайковский, В.Н.Голубев, О.Г.Бурдо, А.С.Титлов. - №3927536/23-06. Заяв. 09.07.85, опубл. в Б.И., 1987, № 37.

25. А.с.1343232 (СССР). Тепловая труба /Одес.технол.ин-т пищ.пром-сти им.М.В.Ломоносова; З.Ш.Семерханов, О.Г.Бурдо, Г.Ф.Смирнов, А.С.Титлов. - № 4049627/24-06. Заяв. 07.04.86, опубл. в Б.И., 1987, № 37.

26. А.с.1371685 (СССР). Способ холодильной обработки биологических объектов /Одес.технол.ин-т пищ.пром-сти им.М.В.Ломоносова; О.Г.Бурдо, С.Ф.Горыкин, А.А.Гладушняк. - № 4133278/24-06. Заяв. 15.10.86. (ДСП).

27. Алгоритм расчета температурных полей камеры, выполненной в виде теплообменника из концентрических сфер (АР-ТКС) /Р.А.Бахтиозин, О.Г.Бурдо, Н.С.Перетьяка. //Респ. фонд. Алгорит. программ ИК АН УССР, 1974.

28. Бахтиозин Р.А., Бурдо О.Г., Смирнова Ж.Б. Алгоритм расчета оптимальных параметров жидкостной системы охлаждения с тепловыми трубами. //Математическое моделирование и системный анализ теплообменного оборудования. - Киев, 1978. - С.159-162.

29. Бахтиозин Р.А., Бурдо О.Г., Смирнова Ж.Б. Анализ тепловых режимов испытательных термокамер сферической формы. //Вопр. радиоэлектроники. Сер. ТРТО. - 1976. - Вып. I. - С.74-80.

30. Бахтиозин Р.А., Бурдо О.Г., Смирнова Ж.Б. Оценка тепловых сопротивлений сферических прослоек камер для испытания прецизионной аппаратуры. - М., - 1976. - 8с. - Деп. в НИИЭИР. - № 3-4738.

31. Бундюк А.Н., Бурдо О.Г., Беспалов И.Н. Инженерный метод расчета динамики термокамер для испытаний судовой аппаратуры. //Кибернетика на транспорте. - 1977. - № 6. - С.36-40.

32. Бурдо О.Г. Автономные теплоиспользующие генераторы холода. //Холод. техника. - №3. - 1988. - С.25-29.

33. Бурдо О.Г., Алейников В.И., Крицкий В.И. Совершенствование теплотехнологий агропромышленного комплекса на основе тепловых труб и термосифонов. //Тезисы докл. II Всесоюз. конф. "Проблемы энергетики теплотехнологии". - М., 1987. - С.114.

34. Бурдо О.Г., Бахтиозин Р.А., Буицук А.Н. Разработка прецизионных термокамер для испытания аппаратуры. // Тезисы докл. Всесоюз. ко. ф. "Средства автоматизации и контроль процессов производства источников тока". - М., 1975. - С. 21-22.

35. Бурдо О.Г., Биньковский О.Б., Титлов А.С. Экспериментальное исследование теплоотдачи при испарении и кипении в открытых капиллярных каналах. // Тезисы докл. УП Всесоюз. конф. "Двухфазный поток в энергетических машинах и аппаратах". - Л., 1985. - С. 234-236.

36. Бурдо О.Г., Доманский Р.А., Крицкий В.И. Конденсация аммиака и хладонов внутри профилированной трубы. // Тезисы докл. Всесоюз. конф. "Искусственный холод в отраслях агропромышленного комплекса". - М., 1987. - С. 35.

37. Бурдо О.Г., Крицкий В.И., Мохаммед Абдель Вирас Хабиб. Теплообменник на тепловых трубах для предварительного подогрева зерна перед сушкой. // Разработка и совершенствование технологических процессов, машин и оборудования для производства, хранения и транспортировки продуктов питания. - Л., 1987. - С. 29-30.

38. Бурдо О.Г. Оптимизация тонкоплёночных испарителей. // Тезисы докл. Всесоюз. конф. "Искусственный холод в отраслях агропромышленного комплекса". - М., 1987. - С. 89.

39. Бурдо О.Г. Режимы и интенсивность теплоотдачи при парообразовании на профилированных поверхностях. // Инж.-физ. журн., 1987. - Т. 52, № 6. - С. 899-906.

40. Бурдо О.Г., Смирнова Ж.Б. Исследование термических сопротивлений канавчатых структур. // Инж.-физ. журн., 1981. - Т. 40, № 3. - С. 535-536.

41. Бурдо О.Г., Смирнова Ж.Б. Коэффициентный метод расчета параметров системы жидкостного охлаждения с тепловыми трубами. // Вопр. радиоэлектроники. - Сер. ТРТО. - 1979. - Вып. 2. - С. 33-44.

42. Бурдо О.Г., Смирнова Ж.Б. Методика выбора геометрических параметров канавчатых тепловых труб. // Инж.-физ. журн., 1982. - Т. 43, № 5. - С. 852.

43. Бурдо О.Г., Смирнова Ж.Б. Моделирование теплообмена на профилированных поверхностях испарителей. // Тезисы докл. Всесоюз. сем. "Использование достижений холодильной техники и технологии в целях повышения эффективности пищевых производств". - М., 1981. - С. 52-53.

44. Бурдо О.Г., Смирнова Ж.Б. Расчет термических сопротивлений тепловых труб с канавчатыми структурами. // Вопр. радиоэлектроники. - Сер. ТРТО. - 1982. - Вып. 2. - С. 117-118.

45. Бурдо О.Г., Смирнова Ж.Б. Теплообмен при испарении и конденсации на профилированных (канавчатых) поверхностях. // Тезисы докл.

УІ Всесоюз.конф. по теплообмену и гидравлическому сопротивлению при движении двухфазного потока в элементах энергетических машин и аппаратов.-Л.,1978.-С.82-84.

46. Бурдо О.Г.Совершенствование технологических аппаратов пищевой техники на основе тепловых труб и термосифонов.//Тезисы докл. Всесоюз.конф."Разработка и совершенствование технологических процессов,машин и оборудования для производства,хранения и транспортировки продуктов питания."-М.,1987.-С.108-109.

47. Бурдо О.Г.,Теплов С.М.,Смирнова Ж.Б.Исследование и разработка систем с тепловыми трубами для охлаждения аппаратуры.//Разработка,изготовление и исследование тепловых труб.-Киев,1977.-С.35-36.

48. Бурдо О.Г.Теплообмен в канальных испарителях тепловых труб.-М.,1987.-9с.--Деп. в ВИНТИ 07.07.87.- № 4819-887.

49. Бурдо О.Г.Теплообмен и гидродинамика при парообразовании на профилированных поверхностях.//Тезисы докл.УІ Всесоюз.конф."Двухфазный поток в энергетических машинах и аппаратах".-Л.,1985.-С.228-230.

50. Бурдо О.Г.,Титлов А.С.Принципы получения холода в холодильных трубах.//Тезисы докл.Всесоюз.конф."Искусственный холод в отраслях агропромышленного комплекса".-М.,1987.-С.30.

51. Исследование плёночных испарителей с профилированной поверхностью теплообмена./О.Г.Бурдо,Ж.Б.Смирнова,О.Б.Биньковский,Ле Ван Чанг.//Тезисы доклад. III Всесоюз.конф.по холод.машиностроению.-М.,1982.-С.85-86.

52. Исследование теплообмена на профилированных поверхностях плёночных испарителей /О.Г.Бурдо,Ж.Б.Смирнова,О.Б.Биньковский,Ле Ван Чанг.//Холод.техника и технология.-1984.-Вып.38.-С.30-34.

53. Исследование характеристик системы охлаждения с тепловыми трубами/В.Ф.Чайковский,Р.А.Бахтиозин,О.Г.Бурдо,Ж.Б.Смирнова.//Вопр.радиоэлектроники.Сер.ТРТО.-1977.-Вып.І.-С.61-69.

54. Расчет оптимальных характеристик жидкостных систем охлаждения с тепловыми трубами.Программа/О.Г.Бурдо,Ж.Б.Смирнова,А.П.Колодяжный и др.-- Киев,1981.-Деп.Укр.фонд.Алгорит.программ.-03.03.81.- № 5721.

55. Система термостатирования стенда для температурных испытаний /Р.А.Бахтиозин,Э.Л.Аронов,О.Г.Бурдо,В.А.Соломыкин.//Приборы и системы управления.-1975.- №2.-С.14-16.

56. Смирнов Г.Ф.,Бурдо О.Г.,Семерханов Э.Ш.Абсорбционно-диффузионное холодильное устройство на основе тепловой трубы.//Холод.

техника и технология.-Киев,1981.-Вып.32.-С.24-28.

57. Смирнов Г.Ф.,Бурдо О.Г.,Ярошевич И.В. Исследование эффективной теплопроводности канавчатых тепловых труб методом электротепловой аналогии.//Разработка, изготовление и исследование тепловых труб.-Киев,1977.-С.14.

58. Теплов С.М.,Бурдо О.Г.,Смирнова Ж.Б.Охлаждение приборного шкафа при помощи тепловых труб.-Д.,1981.-Деп. в ЦНИИ "Румб" 02.02.81.- № ДР-1274.

59. Теплов С.М.,Бурдо О.Г.,Смирнова Ж.Б.Расчет характеристик системы водяного охлаждения приборного шкафа.-Д.,1981.-Деп. в ЦНИИ "Румб" 29.01.81.- № ДР-1273.

60. Титлов А.С.,Бурдо О.Г.,Биньковский О.Б. Новые конструкции безнасосных теплоиспользующих холодильных устройств.//Тезисы докл."Пути интенсификации производства и применения искусственного холода в отраслях АПК".-М.,1985.- С.41.

61. Титлов А.С.,Бурдо О.Г. Схемы утилизаторов низкопотенциальной теплоты на основе холодильных труб.// Тезисы докл.II Всесоюз.конф."Проблемы энергетики теплотехнологии".-М.,1987.-С.116.

62. Чайковский В.Ф.,Бурдо О.Г.,Смирнов Г.Ф. Новые конструкции теплоиспользующих генераторов холода.// Холод.техника.-1983.- №4.-С.13-17.

63. Chaikovsky V., Smirnov G., Burdo O. and others. Complex investigation of characteristics and processes in artery-grooved heat pipes.// Proc. 3-rd int. Heat Pipe conf.- Palo Alto. USA.- 1978.- P. 426-433.

