

Автореферат
4

Одесский технологический институт пищевой промышленности
имени М.В.Ломоносова

Для служебного пользования

Экз. № 00051

~~Инв. № 2488
13.02.86 г.~~

На правах рукописи

~~ЧЕБУРЕНКО Виктор Павлович~~

УДК 621.565.93/94;533.6:

536.24+621.74.043.3:664

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
И АППАРАТОВ ХОЛОДИЛЬНЫХ УСТАНОВОК ПРЕДПРИЯТИЙ
АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА

Специальность 05.18.12 – процессы и аппараты
пищевых производств

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

~~Коп. № 2
13.02.86~~

Одесса – 1986

Работа выполнена в Одесском технологическом институте
холодильной промышленности

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор М.С.АМИНОВ,
доктор технических наук,
профессор Г.Е.КАНЕВЕЦ,
доктор технических наук,
В.Г.ФЕДОРОВ

Ведущая организация – Московский технологический институт
мясной и молочной промышленности (МТИМЛП)

Защита состоится "11" апреля 1986 г. в
10.30 час. на заседании специализированного совета Д 068.35.01
при Одесском технологическом институте пищевой промышленности
имени М.В.Ломоносова, 270039, Одесса, ул.Зверлова, 112.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Одесского
технологического института пищевой промышленности имени
М.В.Ломоносова,

Автореферат разослан "24" февраля 1986 г.

Ученый секретарь
специализированного совета
кандидат технических наук,
доцент

ОНАХТ Автореф
Повышение эффективно



v017811

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Актуальность работы. Экономическая политика, определенная
XXVI съездом КПСС на одиннадцатую пятилетку и на период до 1990 г.,
предусматривает высокие темпы развития всех звеньев агропромышлен-
ного комплекса в целях значительного увеличения производства продук-
тов питания, снижения различного рода потерь на всех стадиях непре-
рывного цикла производства, транспортировки, переработки и хранения
сырья, полуфабрикатов и готовой продукции; бесперебойного снабжения
страны продовольствием и повышения благосостояния народа. При про-
ектировании и строительстве новых и реконструкции действующих пред-
приятий следует внедрять научно-технические достижения по усовер-
шенствованию холодильных систем, созданию эффективных машин и аппа-
ратов, высокоэкономичных малоотходных и безотходных технологий.

Существующее в пищевой промышленности в настоящее время оборудо-
вание поставлено на производство более 10 лет назад, морально
устарело, имеет низкие тепловые и эксплуатационные характеристики,
вышая категория качества присвоена всего 17% оборудования в общем
объеме поставок, поэтому задача особой важности – повышение техни-
ческого уровня оборудования, способного значительно интенсифициро-
вать технологические процессы обработки пищевых продуктов и эконо-
мить материальные, водные и энергетические ресурсы.

Работа выполнялась согласно научно-техническим заданиям И3/6,
РН 16.02.06, РН 16.03.18 и РН 16.04.21 Государственных планов эконо-
мического и социального развития СССР; заданиям Продовольственной
программы, а также НИР № 2.220.17.05.77(16), утвержденной постанов-
лением ГК СМ СССР по науке и технике; планам развития научных ис-
следований и ускорения научно-технического прогресса по Одесской
области на 1978–1985 гг. Отдельные разделы диссертации связаны с
разработкой НИР по комплексному плану ОТИХП.

Цель и задачи исследования. Целью настоящей работы являлось

совершенствование методов холодильной обработки пищевых продуктов на основе использования эффективных теплообменных устройств, обеспечивающих снижение энерговодопотребления.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи: изыскание способов интенсификации технологических процессов при холодильной обработке пищевых продуктов; изыскание способов экономии материальных, энергетических и водных ресурсов при изготовлении и эксплуатации теплообменного оборудования; повышение эффективности процессов тепломассообмена и создание интенсивных трубчато-ребристых поверхностей; выбор оптимальных форм и геометрических параметров элементов пучков ребристых труб и испытания их на режимах, обеспечивающих холодильную обработку пищевых продуктов; исследование тепловой эффективности трубчато-ребристых поверхностей и процессов теплообмена и аэродинамики в аппаратах холодильных установок и создание основ для их проектирования; определение эксплуатационных характеристик технологических режимов холодильной обработки продуктов; влияние дисперсного состава капель факела, скорости движения воздуха в камере и степени орошения на эффективность процесса тепломассообмена; составление методики выбора экономичных способов отвода тепла и разработка рациональных режимов эксплуатации холодильных комплексов; определение направлений дальнейших совершенствований технологий пищевых производств.

Объекты исследований. Технологические процессы холодильной обработки, системы охлаждения и воздухораспределения, опытные и опытно-промышленные образцы теплообменных аппаратов исследовались в комплексе действующих мясокомбинатов (УССР - гг.Одесса, Вознесенск, Бахмач), распределительных (УССР - г.Киев, РЭССР - гг.Москва, Пермь, Шахты, Орехово-Зуево), ПО "Азот" (БССР - г.Гродно, УССР - г.Черкассы), усовершенствованные теплообменные элементы - на лабораторных стендах. Объектом исследования служило разработанное техно-

логическое оборудование для изготовления трубчато-ребристых поверхностей.

Методы исследований. В работе использованы современные методы исследований: проведены испытания и сопоставления энергетических, эксплуатационных, объемных и массовых характеристик предлагаемых и существующих способов обработки мясных продуктов и растительного сырья; камер замораживания, обработки и хранения; систем охлаждения и воздухораспределения, оборудованных аппаратами из эффективных трубчато-ребристых поверхностей; аналитическим путем определена тепловая эффективность пучков ребристых труб и исследован процесс тепломассообмена при охлаждении воздуха, поступающего в пучок труб конденсатора; гостированным методом проведены: определение качества пищевых продуктов (ГОСТ 21784-76), приемочные испытания и сдача опытно-промышленных образцов аппаратов и опытно-промышленного производства трубчато-ребристых поверхностей ведомственным и межведомственным комиссиям (ГОСТ 15.001-73), исследования химического состава литейных сплавов (ГОСТ 11739.0-78 - 11739.24-78) и механических свойств выплавленных сплавов (ГОСТ 1497-73 и 9012-59); дегаустацией проб бульонов подтверждены хорошие показатели замороженных мясных продуктов; термографическим (с помощью жидких кристаллов визуально) и термоэлектрическим способами определены температурное поле ребристого элемента, температуры теплообменных поверхностей и тепло(холодо)-носителей; результаты исследования процессов теплообмена и аэродинамики обобщены критериальными зависимостями и обработаны в графической форме в виде номограмм; по методу планирования пассивного и активного эксперимента проведена обработка опытных данных исследований и решены задачи оптимизации; массовым методом измерены расходы тепло(холодо)носителей; оптическим пирометром контролировалась температура расплава; с помощью различных приборов измерены давления рабочих сред и перепады давлений в пучках труб; по методике определения эко-

номической эффективности производства и использования в народном хозяйстве новой техники, изобретений и рационализаторских предложений и типовой методике определения капитальных вложений выполнены расчеты экономических показателей.

Основные положения, защищаемые автором в работе

1. Способ повышения эффективности процессов холодильной обработки мясных продуктов и хранения растительного сырья путем использования теплообменных поверхностей, а также аппаратов с переменными шагом ребер, проходным сечением по ходу воздуха, обеспечивающих стабильный температурный режим в камерах холодильников.

2. Способы термодинамического совершенствования холодильных установок и модернизации систем оборотного водоснабжения, позволяющие повысить их энергетические показатели.

3. Методики определения оптимальных, характеризующихся минимумом приведенных затрат режимов эксплуатации теплообменного оборудования для холодильной обработки пищевых продуктов.

4. Математические модели, позволяющие оценить тепловую эффективность моно- и биметаллических трубчато-ребристых поверхностей.

5. Технологические и конструктивные решения по созданию теплообменных элементов аппаратов пищевых производств и по компоновке развитых трубчато-ребристых поверхностей с высокими тепловыми, энергетическими, массовыми и объемными характеристиками.

6. Закономерности процессов теплообмена и аэродинамики в пучках оребренных труб на стороне воздух-поверхность и поверхность-рабочее тело (конденсирующийся холодильный агент).

7. Математическая модель взаимодействия капельной влаги с воздухом, позволяющая определить форму, размеры и величину пути движения капель до полного усвоения жидкости воздушным потоком.

8. Теоретические основы расчета и выбора конструктивных параметров теплообменных аппаратов из биметаллических трубчато-ребри-

тых поверхностей, обеспечивающих замену дефицитных материалов.

Научная новизна. Теоретически и экспериментально обоснована интенсификация процессов холодильной технологии при обработке пищевых продуктов путем использования аппаратов с биметаллической (сталь-алюминий) теплообменной поверхностью, изготовленной методом литья, теплообмена и аэродинамики, способствующих решению народнохозяйственных задач по выполнению Продовольственной и Энергетической программ.

Практическая ценность работы. Рассмотренные способы интенсификации процессов холодильной технологии пищевых продуктов, сокращения циклов их обработки и продолжительности удаления снежного покрова с теплообменной поверхности, а также внедрение эффективных аппаратов значительно уменьшают естественные потери продуктов и сокращают электроводоотребление при эксплуатации, а применение воздушных теплообменников позволяет почти полностью отказаться от использования пресной воды.

Предложенные методы расчета и проектирования эффективного оборудования способствуют усовершенствованию охлаждающих систем камер фруктоовощехранилищ, распределительных и производственных холодильников.

Выполненные образцы трубчато-ребристых поверхностей способствуют сокращению расходов дефицитных материалов (алюминиевых толстостенных труб, стальных бесшовных труб, тонколистовой стали, цветного металла), а внедренный способ изготовления литых оребренных поверхностей позволяет получить теплообменные элементы различных геометрических параметров.

Разработанные модули оребренных элементов и теплообменных секций облегчают процессы изготовления гаммы трубчато-ребристых поверхностей и аппаратов.

Выводы, полученные в работе, могут быть реализованы при использовании естественного холода.

Различные варианты компоновки пучков труб и оребренных элементов расширяют области применения интенсивных теплообменных поверхностей, выполненных методом литья под давлением.

Реализация результатов исследования. В комплексе действующих предприятий искусственного холода усовершенствовано 14 технологических процессов путем модернизации охлаждающих систем и внедрения теплообменных аппаратов, суммарный экономический эффект при эксплуатации которых составил 1,7 млн.рублей (с учетом долевого участия вуза - 0,98 млн.рублей).

Совместно с Одесским комплексным проектным отделом "Укртормясопром" разработана технологическая линия поточной холодильной обработки мясных продуктов с эффективными воздухоохладителями для Ужгородского мясокомбината (УССР).

Проектная контора "Львовмясопромпроект" Минмясопрома УССР выполняет техническую документацию на реконструкцию систем охлаждения и воздухораспределения мясо(мол)комбинатов Украины с использованием теплообменных аппаратов; предложенные в работе трубчато-ребристые поверхности легли в основу градации постаментных воздухоохладителей; по этим материалам Одесское СНМУ "Хладмонтавтоматика" Минмясопрома УССР изготавливает аппараты для предприятий отрасли.

Приемочные (межведомственные и ведомственные) комиссии в 1979-1984 гг. рекомендовали опытно-промышленные образцы аппаратов для серийного выпуска, присвоив им первую категорию качества, а усовершенствованный технологический процесс литья биметаллических теплообменных поверхностей - в массовое производство. В 1981-1985 гг. Харьковский и Днепропетровский экспериментально-механические заводы РО "Укрмясопромремаш" освоили изготовление оборудования для потребителей производственных объектов (приказы Минмясопрома УССР № 74 от 20.02.79 г., № 441 от 18.12.79 г., № 41 от 8.02.84 г.).

Проектная документация на образцы, принятые МВК, передана в

Одесский центр НТИ. В настоящее время получено более 80 запросов от организаций пищевой, мясо-молочной, рыбной, кондитерской и др. промышленности с целью внедрения аппаратов. Кроме того, материалы исследований включены в "Каталог прогрессивных технологий и технических решений, рекомендуемых для внедрения на предприятиях и в организациях Одесской области в XI пятилетке".

Отлито 103500 м², из которых изготовлено 75 аппаратов (воздухоохладителей, батарей, конденсаторов и других теплообменников).

Литейные участки для выпуска теплообменных оребренных элементов созданы в ПО "Азот" Минудобрений СССР (г.Гродно, БССР и г.Черкассы, УССР) и на Криворожском ремонтно-механическом комбинате РПО "Укрторгтехника" Минторга УССР, создается крупное литейное производство на заводе "Машстройконструкция" РО "Укрмясопромремаш" в г.Орехове Запорожской области (приказ Минмясопрома УССР № 10 от 12.01.83 г.).

Для использования результатов работы в мясной и молочной промышленности издана обзорная информация "Эффективные теплообменные аппараты для производства искусственного холода". Результаты исследований реализуются в учебном процессе при чтении лекций по курсам "Холодильная технология пищевых продуктов" и "Холодильные установки", для студентов специализированных вузов выпущен учебник "Холодильные установки".

Разработанное научное направление использовано и развито в диссертационных работах Ремедиоса Карбахаласа Эктора (1975 г.), Ивановой В.С. (1975 г.), Монтеагудо Гарсиа Мануэля (1981 г.), Хосе Антонио Гонсалеса (1981 г.), Кинтеро Кабрера Диего Андреса (1983 г.), Лагутина А.Е. (1983 г.), Хмаладзе О.Ш. (1984 г.).

Апробация работы. Основные результаты диссертации были предметом докладов и обсуждения на научных конференциях ОТИХП (г.Одесса, 1970-1985 гг.), на Всесоюзных и республиканских семинарах "Особен-

ности изготовления теплообменников" (г.Москва, 1980 г.). "Пути повышения эффективности получения и использования искусственного холода" (г.Ташкент, 1980 г.), "Использование достижений холодильной техники и технологии в целях повышения эффективности пищевых производств" (г.Таллин, 1981 г.), "Перевод холодильных установок предприятий молочной промышленности на комплексную автоматизацию с периодическим обслуживанием" (г.Севастополь, 1982 г.), "Использование искусственного холода для сокращения потерь пищевых продуктов - важное средство в решении Продовольственной программы страны" (г.Калининград, 1983 г.), на I-й республиканской научно-технической конференции по вопросу достижения науки и передового опыта производства в мясной промышленности (г.Киев, 1988 г.), на V республиканской конференции "Повышение эффективности, совершенствования процессов и аппаратов химических производств" (г.Днепропетровск, 1980 г.), на республиканской научно-практической конференции работников холодильной промышленности (г.Ростов-на-Дону, 1980 г.), на Всесоюзных совещаниях и конференциях "Создание и применение трубчатой и пластинчатой теплообменной аппаратуры" (г.Таллин, 1974 г.), "Совершенствование процессов, машин и аппаратов холодильной и криогенной техники и кондиционирования воздуха" (г.Ташкент, 1977 г.), "Математическое моделирование, системный анализ и оптимизация промышленного и транспортного теплообменного оборудования" (г.Киев, 1978 г.), "Повышение эффективности процессов и оборудования холодильной и криогенной техники" (г.Ленинград, 1981 г.), на I, II и III Всесоюзных научно-технических конференциях по холодильному машиностроению (г.Москва, 1972 г.; г.Малитополь, 1978 г.; г.Одесса, 1982 г.), на III Всесоюзной научной конференции "Совершенствование машин и аппаратов химических производств" (г.Навои, 1983 г.), на конференциях с участием специалистов социалистических стран по научно-техническим проблемам мясной и молочной промышленности (г.Москва, 1976 г.), на III и IV Национальных

научно-технических конференциях с международным участием "Холодильная и автономная техника кондиционирования" (г.София, НРБ, 1976 г.) и "Современные направления в развитии холодильной техники и технологии" (г.Пловдив, НРБ, 1977 г.), на совместном заседании Научных Советов АН УССР по комплексной проблеме "Теплофизика" (подсекция "Термодинамика и процессы теплообмена в холодильных установках"), объединенной республиканской секции математического моделирования и системного анализа химико-технологических процессов и аппаратов Украинского республиканского правления ВХО им.Д.И.Менделеева и Одесского технологического института холодильной промышленности (г.Одесса, 1978 г.), на заседании технического совета Казминмашомолпрома (г.Алма-Ата, 1981 г.), на заседании Комиссии Государственного Комитета СССР по науке и технике по внедрению в производство НИР, проводимых в высших учебных заведениях (г.Москва, 1980 г.) (протокол № 22 от 26 сентября 1980 г.), на Всесоюзном коллоквиуме "Процессы и аппараты пищевых производств" (г.Москва, 1982 г.), на XVI Международном конгрессе по холоду (г.Париж, 1983 г.), на Совете Дальневосточного научного центра АН СССР в секции "Массотеплоперенос в технологических процессах" (г.Владивосток, 1984 г.), на Всесоюзной конференции "Пути интенсификации производства и применения искусственного холода в АПК" (г.Ташкент, 1985 г.).

Результаты исследований, представленные на конкурсы лучших НИР, выполненных в вузах страны, в 1980 г. в работе "Разработка, исследование и внедрение высокоэффективных конденсаторов аммиака с воздушным охлаждением и воздухоохладителей для производственных и распределительных холодильников" отмечены Почетной грамотой МВССО СССР и ЦК профсоюзов работников просвещения, внешней школы и научных учреждений. Экспонаты демонстрировались на республиканской межвузовской выставке ("Литые оребренные поверхности для эффективной теплообменной аппаратуры") и на ВДНХ СССР ("Конденсатор воздушного ох-

ладения" и "Эффективный воздухоохладитель"). Последний экспонат отмечен серебряной медалью.

Публикации результатов исследования. По теме диссертации опубликованы 74 печатные работы, в которых изложены основные положения выполненных исследований, и получены два авторских свидетельства на изобретения.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, семи глав, основных выводов, списка использованных источников, содержащего 252 наименования, из которых 49 – иностранных, приложения.

Работа изложена на 369 страницах, из которых 193 основного машинописного текста, 21 таблица, 96 рисунков. В приложения включены иллюстрационный материал, расчеты экономических эффектов, материалы внедрения и приемочных испытаний.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение содержит обоснование актуальности направления исследований. Анализ процессов тепло-массообмена и технических средств, обеспечивающих промышленную холодильную обработку и хранение пищевых продуктов, показал, что для реализации требуемых технологических режимов отечественное и зарубежное холодильное оборудование должно иметь увеличенную в 1,8 раза площадь поверхности охлаждения по сравнению с расчетной. Современная теплообменная аппаратура с пластинчатым и витым оребрением обладает низкими эксплуатационными показателями ($K = 10...15 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$, $q_n = 40...70 \text{ Вт}/\text{м}^2$ и $G_p = 0,4...0,8 \text{ м}^3/\text{ч}$ на 100 м^2 площади поверхности воздухоохладителя; $\psi = 9...14,6$ – для конденсаторов воздушного охлаждения). Применение интенсивных трубчато-ребристых поверхностей ($K = 15...20 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$, $q_n = 160...180 \text{ Вт}/\text{м}^2$ – для воздухоохладителей и снижение средней температуры конденсации на $3...4$ градуса) при использовании холода для производства, хранения, переработки и транспортировки около 1 млрд. тонн в год

продуктов животного и растительного происхождения позволит совершенствовать процессы технологии пищевых продуктов, экономить энергетические и водные ресурсы и уменьшить материалоемкость охлаждающих систем на предприятиях агропромышленного комплекса.

Дана формулировка цели работы и изложены защищаемые научные положения.

Глава I "Применение искусственного холода в технологических процессах пищевых производств и других объектах агропромышленного комплекса"

Приведены общие сведения использования искусственного холода при производстве, хранении и транспортировке пищевых продуктов; дана краткая классификация и области применения холодильных установок; определены технологические параметры охлаждаемых и теплоотводящих сред. На иллюстрациях показана динамика роста холодильного хозяйства предприятий АПК.

Глава 2 "Теоретические предпосылки тепловой эффективности оребренных поверхностей и процессов теплообмена при холодильной обработке пищевых продуктов"

В проведенном литературном обзоре даны оценки тепловой эффективности отдельных зон ребра по результатам экспериментальных исследований, выполненных по различным методикам, без учета влияния действительного θ . К теоретическому значению E был введен поправочный коэффициент, учитывающий теоретическое сопротивление материала оребрения.

На процесс передачи тепла через оребренную поверхность, кроме термических сопротивлений материалов, сопротивлений теплоотдачи на внешних поверхностях, влияет контактное сопротивление между сопри-

касающимися поверхностями, которое рассмотрено рядом авторов, как сопротивление круглого контактного "пятна". Было установлено, что размер "пятна" для таких материалов, как сталь, алюминий, медь, графит, одинаков, колебался в пределах 25...30 мкм и мало изменялся при увеличении контактного давления. Площадь контакта при повышении

P_k увеличивалась за счет возрастания количества точек контакта. Данные исследований подтвердили, что сопротивление контактного соединения оребренных труб в аппаратах воздушного охлаждения являлось величиной сравнительно малого порядка, однако при переносе больших тепловых потоков (при значительных температурных напорах) контактное сопротивление может оказаться значительным и им нельзя пренебрегать. Поэтому с целью оценки эффективности трубчато-ребристой поверхности был рассмотрен процесс теплопередачи через двухлопную трубу с радиальными ребрами прямоугольного профиля, разделенную на три отдельные области: А - гладкая стальная труба (основа оребрения), В - гладкая алюминиевая оболочка (наплавка) и С - алюминиевое ребро постоянного сечения. В принятой цилиндрической системе координат $(\bar{r}, \bar{x}, \bar{\psi})$ ось $O\bar{x}$ совпадала с осью трубы, а все переменные температуры $(\bar{\theta}, \bar{t}$ и $\bar{T})$ соответственно в областях А, В и С не зависели от координаты $\bar{\psi}$. Краевая задача для определения относительных избыточных температур в описанных условиях имела вид

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 \theta}{\partial \bar{r}^2} + (\frac{\partial \theta}{\partial \bar{r}})(1/\bar{r}) + \frac{\partial^2 \theta}{\partial \bar{x}^2} = 0 & (\text{область А}); \\ \frac{\partial \theta}{\partial \bar{x}} = 0 & \text{при } \bar{x} = 0; \quad \frac{\partial \theta}{\partial \bar{x}} = 0 & \text{при } \bar{x} = 1; \\ a \leq \bar{r} \leq c \\ \delta^2(1-\theta) = \frac{\partial \theta}{\partial \bar{r}} & \text{при } \bar{r} = a; \quad 0 \leq \bar{x} \leq 1. \end{cases}$$

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 t}{\partial \bar{r}^2} + (\frac{\partial t}{\partial \bar{r}})(1/\bar{r}) + \frac{\partial^2 t}{\partial \bar{x}^2} = 0 & (\text{область В}); \\ \frac{\partial t}{\partial \bar{x}} & \text{при } \bar{x} = 0; \quad \frac{\partial t}{\partial \bar{x}} = 0 & \text{при } \bar{x} = 1; \\ c \leq \bar{r} \leq b \\ \rho^2 t = -\frac{\partial t}{\partial \bar{r}} & \text{при } \bar{r} = b; \quad \omega < \bar{x} \leq 1. \end{cases}$$

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 T}{\partial \bar{r}^2} + (\frac{\partial T}{\partial \bar{r}})(1/\bar{r}) + \frac{\partial^2 T}{\partial \bar{x}^2} = 0 & (\text{область С}); \\ \frac{\partial T}{\partial \bar{x}} = 0 & \text{при } \bar{x} = 0; \quad b \leq \bar{r} \leq f; \\ \rho^2 T = \frac{\partial T}{\partial \bar{x}} & \text{при } \bar{x} = \omega; \quad b \leq \bar{r} \leq f; \\ \rho T = -\frac{\partial T}{\partial \bar{r}} & \text{при } \bar{r} = 1; \quad 0 \leq \bar{x} \leq \omega. \end{cases}$$

где использованы безразмерные переменные

$$\begin{aligned} \bar{r} &= 2\bar{r}/u; \quad \bar{x} = 2\bar{x}/u; \quad a = D_{вн}/u; \quad c = D_k/u; \quad b = D_n/u; \\ f &= D_p/u; \quad \omega = 2\delta_p/u; \quad T_m = t_{вн} - t_n; \quad \theta = (\bar{\theta} - t_n)/T_m; \quad t = (\bar{t} - t_n)/T_m; \\ T &= (\bar{T} - t_n)/T_m; \quad \lambda = \lambda_p/\lambda_{тр}; \quad \rho^2 = \alpha_n u / (2\lambda_p); \quad \delta^2 = \alpha_{вн} u / (2\lambda_{тр}); \end{aligned}$$

Искомые функции удовлетворяли также условиям сопряжения на границе областей В и С

$$\begin{cases} t = T \\ \frac{\partial t}{\partial \bar{r}} = \frac{\partial T}{\partial \bar{r}} \end{cases} \begin{matrix} \text{при } \bar{r} = b; & 0 \leq \bar{x} \leq \omega; \\ \text{при } \bar{r} = b; & 0 \leq \bar{x} \leq \omega \end{matrix}$$

и условиям на поверхности неидеального контакта

$$\begin{cases} \frac{\partial \theta}{\partial \bar{r}} = \lambda (\frac{\partial t}{\partial \bar{r}}) & \text{при } \bar{r} = c; \quad 0 \leq \bar{x} \leq 1; \\ \theta - T = \lambda_{тр} c \chi_{к.л.}(x) \frac{\partial \theta}{\partial \bar{r}} & \text{при } \bar{r} = c; \quad 0 \leq \bar{x} \leq 1. \end{cases}$$

Функция $\chi_{к.л.}(x)$ в безразмерных переменных была выражена

в виде

$$\begin{aligned} \chi_{к.л.}(x) &= \bar{\chi}_{к.л.} + \sum_{n=1}^{\infty} \chi_{к.л.н} \cos(n\pi x); \\ \bar{\chi}_{к.л.} &= \int_0^1 \chi_{к.л.}(x) dx; \quad \chi_{к.л.н} = 2 \int_0^1 \chi_{к.л.}(x) \cos(n\pi x) dx. \end{aligned}$$

Для решения поставленной задачи был использован метод Фурье (разделение переменных). В конечном счете задача свелась к решению линейных бесконечных систем второго рода, причем, учитывая цель исследования Π_k ($\Pi_k = q_p/q_w$), оказалось достаточным найти лишь неизвестные X и $\dot{X}$. При получении аналитических выражений для X и $\dot{X}$ были использованы только первые члены асимптотического разложения модифицированных функций Бесселя для больших (больше 10) значений аргумента. При всех аналитических выкладках

пренебрегали величинами порядка малости ρ^2 и выше по сравнению с единицей.

$$\Pi_k = \chi / \bar{\chi} = R_z / (R_z - R_t);$$

$$\chi = -1 / (2\lambda_p R_z - T_1 / \Gamma);$$

$$\bar{\chi} = -1 / (2\lambda_p) R_z,$$

где $R_z = \bar{\varepsilon}_{k,l} + \bar{\varepsilon}_{k,l}$; $\Gamma = 1 - \Gamma_n$; $R_t = T_1 / (2\lambda_p) \Gamma$.

В качестве модели $\bar{\varepsilon}_{k,l}$ была принята функция

$$\bar{\varepsilon}_{k,l}(x) = \begin{cases} \bar{\varepsilon}_{k,l} = \text{const} & \text{при } 0 \leq x < \omega; \\ \bar{\varepsilon}_{k,l} = \text{const} & \text{при } \omega < x < 1; \end{cases}$$

$$\bar{\varepsilon}_{k,l} = \bar{\varepsilon}_{k,l} + (\bar{\varepsilon}_{k,l} - \bar{\varepsilon}_{k,l}) \omega; \quad \bar{\varepsilon}_{k,l,n} = 2\omega (\bar{\varepsilon}_{k,l} - \bar{\varepsilon}_{k,l}) \omega_n;$$

$$\bar{\varepsilon}_{k,l,n} = [\bar{\varepsilon}_{k,l} + \omega (\bar{\varepsilon}_{k,l} - \bar{\varepsilon}_{k,l}) \omega_{2n}] / 2;$$

$$\bar{\varepsilon}_{k,l,m} = \omega (\bar{\varepsilon}_{k,l} - \bar{\varepsilon}_{k,l}) (\omega_{n+m} + \omega_{n-m}) / 2; \quad (n \neq m).$$

После преобразования Π_k определено двумя составляющими R_0

$$R_0 = h [1 + h / (2\delta) + \omega / \delta] / \{ [1 + h / (2\delta) + \omega / \delta] h + 1 + 2 [1 + h / (2\delta)] \psi \}; \quad R_0 \geq 0;$$

$$\psi = \rho^2 / \{ \rho^2 + \delta \omega / h^2 [1 + h^2 / (2\delta + h)^2] \};$$

учитывающими геометрические параметры оребрения и влияние переменного контактного термического сопротивления оребренной поверхности.

Функции R_0 и ψ монотонны по всем своим аргументам:

$$0 \leq \psi \leq 1 \quad \text{и} \quad 0 \leq R_0 \leq 1.$$

Установлено, что q_{tr} определена через среднюю величину линейного контактного сопротивления ($\bar{\varepsilon}_{k,l}$). Для развитой поверхности ребра величина q_p выражена через переменную величину кон-

тактного термического сопротивления вдоль оси трубы. Были выполнены расчеты Π_k для оребренных поверхностей из различных материалов (стальная труба и ребро, стальная труба и алюминиевое ребро) при изменении $D_{вн}$, D_n , $D_{тр}$, δ_p , U и $\alpha_n = 10, 50, 120 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$. Оценено влияние отдельных величин.

Дано аналитическое выражение $E_{эл}$ тонкого эллиптического ребра. Вывод формулы проведен в условиях конвективного теплообмена при постоянном α_s . Стационарное уравнение теплопроводности и заданные граничные условия, приведенные в безразмерных полярных координатах, были решены с учетом теплообмена через боковую поверхность эллиптического ребра. При решении задачи были использованы модифицированные функции Бесселя первого рода n -го порядка и функции Макдональда n -порядка. С точностью, необходимой для практических расчетов, выведена формула определения $E_{эл}$

$$E_{эл} = E_{кр} (1 - \xi^2 / 2),$$

где

$$\xi = 1 / (1 - \varphi^2) - 1 / D_{вн} R S m; \quad (\xi > 0);$$

$$\varphi = D_{вн} / D_n; \quad R = \bar{K}_1 T_1 - \bar{I}_1 K_1; \quad S = K_0 T_1 - \bar{I}_0 K_1;$$

$$m = 2\alpha_n / \lambda_p \delta_p; \quad \bar{K}_i = K_i(\rho_e); \quad K_i = K_i(\rho_0); \quad \bar{I}_i = I_i(\rho_e); \quad i = 1, 2, \dots$$

Таким же способом получено аналитическое решение эффективности радиального ребра переменного сечения

$$E_{пер} = 2 [\rho^2 - 2\rho^2 (1 - \beta - \beta^2) / 3 - \Phi^2 (2 + \beta - \beta^2) / 6] \mathcal{F},$$

где $\beta = \sigma / \tau = (1 - \varphi) / (1 + \varphi)$; $\Phi = 2\beta \tau = \beta m D_p / (1 + \beta)$;

$$\varphi = D_n / D_p; \quad m = 2\alpha_{ср} / \lambda_p \delta_{макс}.$$

Рассмотрены вопросы тепломассообмена при охлаждении воздушной теплоотводящей среды путем адиабатного увлажнения с помощью дисковых распылителей. Высокая эффективность их работы обеспечивалась при полном усвоении капальной влаги потоком воздуха. Для определе-

v 0 17811

ОНАХТ

БИБЛИОТЕКА

ния диаметра капли (2ψ) и величины пути ее движения до полного испарения (расстояния, на котором следует устанавливать распылитель) были решены дифференциальные уравнения переноса количества движения и массы капли

$$\begin{aligned} (\partial w_{\text{кал}} / \partial \psi) (\partial \psi / \partial \tau) &= (3c/8\psi) (\rho_0 / \rho_{\text{кал}}) (w_0 - w_{\text{кал}})^2 - \\ &- [1 - (\rho_0 / \rho_{\text{кал}})] / g - (3w_{\text{кал}} / \psi) (\partial \psi / \partial \tau); \quad \partial \psi / \partial \tau = -\lambda / 2\psi. \end{aligned}$$

При этом принята сферическая форма капли и вертикальное неравномерное движение ее в восходящем потоке воздуха. Так как ρ_0 и M_0 весьма малы по сравнению с $\rho_{\text{кал}}$ и $M_{\text{кал}}$, то движение капли не отличалось от движения твердой частицы той же формы и размеров. Для практических расчетов 2ψ капли вычислялся по формуле

$$2\psi = (2/Sc) [1 + 0,276 Sc^{1/3} Re^{1/2}] \rho_0 M_0 (P_s - P) / \rho_{\text{кал}} M_{\text{кал}} P_0,$$

где $Sc = M_0 / D\rho_0$

Характерный диаметр капли — 10 и 20 мкм, значения длины пути капли до полного усвоения воздушным потоком, соответственно, равны 0,13 и 0,31 м.

Глава 3. "Эффективные трубчато-ребристые поверхности теплообмена для аппаратов пищевых производств"

Для оборудования, обеспечивающего усовершенствование процессов холодильной обработки пищевых продуктов и термодинамически экономичные режимы эксплуатации холодильных установок, создано двенадцать типов поверхностей с радиальными круглыми и эллиптическими ребрами трапециевидного и переменного профилей с основной трубой $\varnothing 57$ х 3,5, $\varnothing 38$ х 2,0 и $\varnothing 25$ х 1,6 мм и $\psi = 4,19...32,90$; и тринадцать типов основных и вспомогательных модулей ребристых поверхностей для трубы $\varnothing 25$ х 2,5 мм с $D_p = 80$ мм, $\delta_0 - 0,8$ мм,

$\delta_0 - 1,8$ мм, $\delta_{\text{кал}} - 1,5$ мм с U основного модуля 4,2; 5,0 и 5,9 мм, U вспомогательных модулей кратен U основного модуля.

Получение развитых поверхностей теплообмена предложено методом литья под давлением, при котором обеспечивается высокая точность геометрических размеров и требуемая чистота поверхности. Сущность метода заключается в том, что расплавленный металл (алюминиевый расплав) подается под давлением в стальную разъемную форму на цельнотянутую очищенную и обезжиренную трубу, заполняет полость формы и застывает в ней, приобретая очертания детали (оребрения). Рабочее давление на расплав (50...55 МПа) и скорость прессования (40...45 м/с) обеспечивают хорошую заполняемость рабочих полостей жидким металлом. Кристаллизующийся алюминиевый сплав, вследствие усадки, плотно охватывает трубу, поэтому между основой (трубой) и оребрением не возникает воздушная прослойка. Наружная теплообменная поверхность покрывается прочной оксидной пленкой, предохраняющей ее от коррозии. Этим способом можно изготовить оребрённые элементы практически любых геометрических форм (профилей) с различными ψ . Зеркальная поверхность ребра снижает интенсивность процесса осаждения инея на теплообменный элемент.

В качестве литейного материала выбран алюминиевый сплав АК7 на кремниевой основе, который соответствует ГОСТу 2685-75. Разработаны смазки для нанесения на рабочую поверхность пресс-формы и узла прессования. Пресс-форма состоит из неподвижной и подвижной частей, литниковой втулки, формообразующих вкладышей и системы толкателей.

Предложены четыре конструкции литникового канала. Подача металла осуществляется по двум вариантам: в лобовую часть трубы и под углом к вертикальной оси. Разработаны пресс-формы с длинами пакетов: 157,8 мм, 220,0 мм, 450,0 мм и 803,0 мм.

Технологическая карта процесса предусматривает восемь операций: подготовку шихтовых материалов, плавку алюминиевого сплава, рафинирование сплава, зачистку труб, подготовку литейной машины и пресс-формы к работе, установку трубы, изготовление отливки, очистку от-

ливков и их контроль. Последние три операции повторяются, пока не будет получена требуемая длина оребренной трубы.

По данному технологическому процессу производства оребренных элементов все операции выполняли три человека. В процессе работы осуществлялось полное смыкание плоскостей пресс-формы, достигались герметичность литниковой втулки и стакана и полная герметичность полостей оснастки; удельное давление и скорость прессования соответствовали технологическим требованиям; температура заливаемого металла составляла $680...700^{\circ}\text{C}$, продолжительность цикла одной запрессовки не превышала $30...35$ с. Химический состав сплава и его механические свойства отвечали требованиям ГОСТов. Шероховатость поверхности составляла $Ra = 0,63$, а размеры отливок соответствовали третьему классу точности. В полученных оребренных элементах недолив ребер не превышал 5%.

При изготовлении трубчато-ребристых поверхностей для аппаратов с теплоподводящей (отводящей) воздушной средой производительность труда возрастала на 6,7%, снижение трудоемкости составляло 18,6%, не требовалось толстостенных алюминиевых труб, тонколистовой стали, расход стальных труб на обработку одной тонны пищевых продуктов сокращался на 40...50%.

Разработана биметаллическая поверхность с эллиптическим ребром с размерами осей 40 и 68 мм. Такая поверхность создает возможность оптимальной компоновки пучка труб, улучшает условия формирования пограничного слоя воздуха за счет уменьшения длины ребра вдоль потока воздуха. Она может быть использована при проектировании и модернизации других теплообменных устройств.

Глава 4 "Современное состояние теории конструирования тепло-массообменных устройств для холодильной обработки пищевых продуктов"

Выполнен обзор теоретических и экспериментальных работ, анализирующих современные методы расчета основных характеристик (авторы

В.М.Антуфьев, А.А.Жукаускас, Э.С.Карасина, В.Б.Кунтыш, Ф.М.Иохведов, В.Ф.Юдин и др.), и посвященных определению оптимальных параметров ребристых поверхностей (авторы В.И.Кэйо, А.Л.Лондон, Л.И.Ройзен, В.П.Исаченко, Э.Шмидт) в условиях конвективного теплообмена для режимов холодильной технологии пищевых продуктов. В основу аналитических методов расчета положены закономерности, описывающие изменение температурного поля для круглых ребер постоянной толщины на цилиндрической поверхности. Приведенные решения по определению оптимальных размеров ребер различного профиля показали, что развитие теплопередающей поверхности целесообразно осуществлять за счет увеличения числа ребер. При этом допустимая степень обложения ребер зависит от скорости и турбулентности потока в межреберных полостях.

Оптимальная степень оребрения теплообменной поверхности для конденсаторов воздушного охлаждения лежит в пределах $20...35$. При высоких значениях ψ правильный выбор геометрии оребрения оказывает влияние на теплоотдачу и потерю напора пучков (ΔP) ребристых труб. Исследования показали, что теплоотдача росла с увеличением и уменьшением D_p . Причем, зависимость влияния D_p оказалась более слабой, при этом ΔP возрастало с увеличением D_p и уменьшением ψ .

Обращено внимание на процессы теплопередачи и аэродинамики при инееобразовании (работы В.С.Ивановой, Н.С.Конанова, Б.К.Явнеля, О.Ш.Хмаладзе). Показана зависимость $\delta_{ин}$ от его кристалло-графической структуры. Установлено резкое возрастание ΔP аппарата в начальный период его работы.

Проведенный анализ показал ограниченность экспериментальных материалов, невозможность использования данных для расчета развитых поверхностей конденсаторов хладагента и воздухоохладителей.

Рассмотрены существующие системы обработки воздуха, предназначенные для воздушно-водоиспарительного охлаждения и систем промыш-

ленного кондиционирования, способствующие увлажнению воздуха, его охлаждению и транспортированию мелкодисперсной влаги к оборудованию; способы тепловлагообмена и конструкции увлажнительных устройств. Для аппаратов воздушного охлаждения возможно применение дисковых распылителей воды после изучения влияния дисперсного состава капель факела, скорости движения воздуха в камере и степени орошения на эффективность процессов теплообмена.

Глава 5 "Экспериментальные исследования аппаратов и их элементов" Опытные образцы теплообменных аппаратов и трубчато-ребристых поверхностей, созданных для условий эксплуатации на предприятиях АПК, были исследованы на экспериментальных стендах и лабораторных установках.

По температурному полю ребристого элемента, локальными значениям α_s и t_s была проведена оценка участия различных зон круглого поперечного ребра в суммарном теплообмене элемента.

Распределение температур по поверхности ребра, обдуваемого вынужденным потоком воздуха, фиксировалось термографическим и термоэлектрическим способами. Изменение внешних или внутренних условий теплообмена приводило к изменению цветовых переходов кристаллов, характеризующих распределение температур по поверхности ребристого элемента. Использование термоминдикаторов было апробировано при фиксации температурного поля одиночного круглого ребра при скоростях движения воздуха в живом сечении рабочего участка $W_s = 3,1 \dots 16,8$ м/с. Определение температуры поперечного дискового ребра осуществлялось при различной ориентации контролируемого участка относительно потока воздуха. Сопоставление результатов показало, что несмотря на общий характер построения изотерм, слой кристалла, который являлся дополнительным термическим сопротивлением, приводил к выравниванию температурного поля, несколько увеличивая площади изотермических зон. Усреднение полученных показателей по высоте ребра

показало, что зона наибольшей теплоотдачи располагалась по потоку $\theta = 30 \dots 90^\circ$, а в кормовой части ребра ($\theta = 150 \dots 180^\circ$) коэффициенты теплоотдачи низки.

Значения температуры охлаждающего потока воздуха по показаниям термопар, установленных в межреберной полости, были использованы для определения температурных напоров между поверхностью и охлаждающей средой. Анализ результатов проведенных исследований показал, что при $W_s = 6,1 \dots 20,0$ м/с максимальные значения Q имели место в зоне ребра ($\theta = 60 \dots 120^\circ$) вследствие высоких значений температурного напора и интенсивной теплоотдачи.

Из теплообменных поверхностей набраны шести- и восьмирядные пучки, которые исследовались в аэродинамической трубе разомкнутого типа. При проведении исследований был использован метод локального моделирования при стационарном Q . В качестве калориметрического выбран поперечный ряд труб. Количество перестановок труб калориметрического ряда принималось равным рядности исследуемого пучка. Испытания проводились при стационарных условиях и скоростях $W_s = 2,3 \dots 11,2$ м/с.

Результаты тепловых и аэродинамических характеристик обобщены критериальными зависимостями

$$\begin{aligned} Nu &= C_1 Re^m; & Eu &= C_2 z Re^{-n} \\ Nu &= 0,116 Re^{0,7} & \text{для труб диаметром } D_o &= 0,025 \text{ м,} \\ Nu &= 0,064 Re^{0,63} & \text{для труб диаметром } D_o &= 0,032 \text{ м,} \\ Eu &= 4,74 z Re^{-0,29} \end{aligned}$$

Значения параметров воздуха λ_s , ν_s и ρ_s принимались по средней температуре охлаждающего потока. В качестве определяющих параметров были выбраны скорость движения воздуха в живом сечении пучка и диаметр у основания ребра. Полученные уравнения справедливы в диапазоне $Re = (5 \dots 20) \cdot 10^3$. Увеличение Sn и уменьшение Sp

привело к увеличению теплоотдачи; стабилизация теплоотдачи по рядам пучка наступала со второго ряда, при этом значение α_0 для первого ряда составляло 80...86% от значения α_0 стабилизированного ряда. Теплоотдача пучка с эллиптической формой ребер была выше на 6,6%, чем теплоотдача круглых ребер. Результаты энергетических сопоставлений показали, что уменьшение живого сечения и ΔP привели к увеличению E пучков с переменным профилем на 10% по сравнению с пучками труб с трапецидальным ребром. Энергетический коэффициент для наиболее развитых теплообменных поверхностей, освоенных отечественной промышленностью, на 26...43% ниже испытанных. Из исследуемых поверхностей лучшими энергетическими показателями обладали пучки труб с эллиптическими ребрами и пучки с круглыми ребрами переменного профиля.

Качественная оценка процесса тепло- и массообмена при контакте воздуха и капель воды, протекающего по изохантипии, проведена с использованием коэффициента эффективности $E = (t_n - t_k) / (t_n - t_m)$:

$$E = 1,04 (W_0 \rho_0)^{0,27} B^{0,14}, \text{ где } B = G_{0,1} / G_0$$

Изучение механизма изеобразования в воздухоохладителях позволило получить зависимость для определения $\delta_{\text{ин}}$ по рядам труб

$$\delta_{\text{ин}} = 1,52 (G_{\text{ин}} \tau / \rho_{\text{ин}} F) z^{-0,12}$$

(для условий $t_0 = -25...-35^\circ\text{C}$, $\varphi = 98...100\%$,

$$W_0 \rho_0 = 4...10 \text{ кг}/(\text{с}\cdot\text{м}^2); \quad I > Z_{\text{пр}} / Z > 0,4).$$

Приведенные результаты исследований обеспечивают правильный выбор конструктивных элементов аппаратов и способствуют экономичной эксплуатации оборудования при интенсификации технологических процессов холодильной обработки пищевых продуктов.

Оценены погрешности результатов прямых и косвенных измерений и определены относительные ошибки конечных результатов, которые не превышали 25%.

Глава 6 "Разработка и создание эффективных теплообменных устройств холодильных установок предприятий АПК"

Для подтверждения теплотехнических и эксплуатационных характеристик технологических режимов обработки пищевых продуктов, а также охлаждающих систем и аппаратов, определения E оребренной поверхности и увлажнительного устройства, проверки работоспособности созданных образцов и целесообразности их широкого внедрения были проведены исследования модернизированных действующих холодильных комплексов объектов торговли, мясной промышленности и производств минеральных удобрений, расположенных в различных климатических зонах.

При разработке конструкции аппаратов особое внимание было уделено выбору типа теплообменной поверхности и оросительного устройства, компоновке пучка труб. Выбор U в приборах охлаждения зависел от способа обработки и вида пищевого продукта. Конструкция теплообменной секции и нагнетателя воздуха для конденсаторов воздушного охлаждения выбирались в зависимости от холодильной мощности компрессорного цеха. Для удаления снежного покрова с испарительных батарей применялись только горячие пары хладагента, отогрев поддона предусматривался с помощью электронагревателей или змеевика, труб с горячими парами. Для адиабатного увлажнения воздуха, поступающего в конденсатор, были использованы дисковые (вертикальные и горизонтальные) распылители.

Выполнена рабочая документация на подвесные воздухоохладители типа ВОП и ВОГ $F = 50...150 \text{ м}^2$ (9 вариантов), на постаментные аппараты вертикального типа $F = 100...600 \text{ м}^2$ (13 вариантов) и горизонтального типа $F = 230$ и 300 м^2 ; на аппарат с переменным проходным сечением $F = 72 \text{ м}^2$; на конденсаторы с вертикальными теплообменными секциями $F = 750...2500 \text{ м}^2$ (7 вариантов) и горизонтальными секциями $F = 2000...4000 \text{ м}^2$ (6 вариантов). Разработаны конструкции охладителей воды и рассола и холодильники поршне-

вых и центробежных компрессоров.

Исследования образцы работали стабильно; продолжительность циклов холодильной обработки составляла 8...18 часов при домораживании мяса и 22...28 часов при замораживании парного мяса говядины II категории и тушек птицы; системы охлаждения и воздухораспределения совместно с воздухоохладителями обеспечивали равномерную температуру по всему объему камеры и в штабеле. ($t_k = -27, -35$ и -40°C , в штабелях $-9...3^\circ\text{C}$); в процессе охлаждения картофеля температуры воздуха и продукта снижались равномерно со средней скоростью не более $0,8^\circ\text{C}$ в сутки; относительная влажность была равна 98...99% (холодильник) и 90% (овощехранилище); $w_b/p_a = 3...10 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$. Средние значения q_n в период обработки продуктов были на 80% выше, чем при эксплуатации действующих объектов. В начальный период цикла обработки продукта (в пределах первого часа) наблюдался рост q_n , что можно объяснить развитием площади теплопередающей внешней поверхности за счет образования снежного покрова с отдельно расположенными центрами кристаллообразования. Затем в течение первой половины цикла эти значения резко снижались, что связано с увеличением толщины слоя инея ($\delta_{ин}$) и возрастанием $\rho_{ин}$, а также уменьшением θ . В дальнейшем скорость нарастания инея и падения θ уменьшались, что привело к более плавному изменению q_n . На заключительной стадии процесса холодильной обработки q_n оставалась практически постоянной ($90...100 \text{ Вт}/\text{м}^2$), что объяснялось стабильностью и постоянной $\delta_{ин}$ на всей поверхности воздухоохладителей. Характер осаднения снежного покрова на поверхности аппарата показал, что динамика инеяобразования на разных по глубине рядах труб неодинакова: на последних рядах рост $\delta_{ин}$ прекращался в первую половину цикла, на средних — продолжался в течение 2/3 цикла, а на первых — иней продолжал оседать почти до конца цикла обработки; максимальная $\delta_{ин}$ достигала 6,4 мм. При работе интенсивных воздухоохладителей наблюдался

унос кристаллов инея в камеру, что объяснялось существенным охлаждением воздуха при его контакте с первыми рядами пучка труб и высокой эффективностью теплообмена. Охлаждение воздуха в пограничном слое у поверхности теплообмена приводило к образованию в потоке воздуха кристаллов льда, которые не осаждались на ребрах и трубах воздухоохладителя, а уносились в охлаждаемое помещение. Масса влаги, осевшая на поверхности аппарата, на 20...25% меньше всей влаги, вымороженной из продукта. Кроме того, удалению инея из аппарата способствовала слабая механическая связь кристаллов инея с поверхностью теплообмена, обусловливаемая небольшой шероховатостью последней, формируемой в процессе литья под давлением. Среднее значение K воздухоохладителей составило $17,5...29,5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ при относительно высокой E ($E = 0,92...0,98$), обусловливаемой хорошим контактом алюминиевого ребра с основной трубой и λ_p . Характер зависимости $\alpha_{пр}$ свидетельствовал о том, что в начальный период обработки наблюдалась некоторая интенсификация теплообмена вследствие эффективного массопереноса и резкого снижения t_a , которые улучшали конвективный теплообмен. Затем значения $\alpha_{пр}$ плавно уменьшались из-за нарастания снежного покрова на первых рядах труб. В последние часы цикла работы аппарата их значения не изменялись. Рост Δp определялся динамикой осаднения инея. Резкое увеличение Δp происходило в начальной стадии цикла обработки продукта, в течение последующего времени наблюдалось плавное его увеличение до максимального значения.

Воздухоохладитель с переменным сечением макрерадиального канала для прохода воздуха обеспечивал равномерное распределение инея по всей теплопередающей поверхности.

В камере фруктоовощехранилища испытана система охлаждения с активным вентилированием, напольной сетью воздухозадачи, раздельным отводом Q через наружные ограждающие конструкции и с аппа-

ратом из литой поверхности, при которой уменьшены потери массы хранимой растительной продукции (картофеля) на 24% и повышено качество продукции на 37% по сравнению со стандартным оборудованием.

Аэродинамические характеристики контура для циркуляции воздуха (воздухоохладитель, воздуховоды, воздухораспределители) удовлетворяли рекомендациям В.З.Задана и Е.П.Широкова по технологическим решениям обработки продуктов.

Снижения массы составили 1,58...1,61% при обработке мяса и 2,96...3,03% - при обработке картофеля. Интенсивный отвод тепла и влаги вследствие надежной работы аппарата и воздухораспределительных устройств оказал существенное влияние на повышение качественных показателей картофеля. Дегустация мясного бульона показала, что изменений во вкусе и в качестве замороженного продукта нет.

Удаление снежного покрова с поверхности производилось горячими парами аммиака с орошением пучка труб теплой водой. Продолжительность оттаивания составляла 15 мин, общая продолжительность оттаивания, включая сдувание поверхности, - 25...30 минут.

Благодаря высокой эффективности оребренной поверхности и небольшому термическому сопротивлению инея исследуемые воздухоохладители оказались компактней серийных аппаратов; расход стальных труб на их изготовление сократился на 30...50%, а грузовой объем охлаждаемого помещения при установке таких аппаратов увеличился на 20%.

В конденсаторах в период пиковых тепловых потоков (при $t_{\text{вн}}$ выше 25°C) использовалось оросительное устройство, обеспечивающее охлаждение воздуха на $5,1...9,7^{\circ}\text{C}$; $G_{\text{вн}}$ составлял 2,2...4,8 г на 1 кг обрабатываемого воздуха; E увлажнителя был равен 0,4...0,8. Интенсивность теплообмена со стороны хладагента в опытных аппаратах повышалась с увеличением $Q_{\text{вн}}$, длины шланга и ростом температуры конденсации. В диапазоне $W_{\text{вп}} = 3,0...11,6 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ K составил $12...29 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, $q_{\text{н}}$ изменялась в пределах $100...750 \text{ Вт}/\text{м}^2$, ΔP

не превышало 126 Па. Высокие значения E (0,92...0,98) при высоких q подтвердили рациональность использования алюминиевого сплава для изготовления оребренных элементов. Выбранные в качестве критериев сопоставления энергетическая, стоимостная и массовая характеристики подтверждали преимущества исследуемых образцов по сравнению с серийными аппаратами. При $t_{\text{вн}}$ ниже 20°C возможно отключение отдельных вентиляторов, а в зимний период конденсаторы эксплуатировались без вентиляторов. Наиболее эффективным оказался аппарат, у которого расход воздуха составил $136 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$.

По результатам исследований предложены пути усовершенствования холодильных установок предприятий АПК; уточнены $Nu = f(Re)$ и $E_u = f(Re)$ для пучков труб, которые положены в основу составленных блок-схем расчетов воздухоохладителей, мелких и крупных конденсаторов, причем для мелких установок теплообменная поверхность охватывает две зоны отвода тепла (охлаждение и конденсацию агента), а для крупных установок указанные зоны рассматриваются раздельно. Обоснован выбор расчетной величины $t_{\text{вн}}$ при проектировании аппаратов воздушного охлаждения. Малые и средние установки желательно укомплектовывать конденсаторами с несколькими вентиляторами типа 06-300 (06-320), а крупные - двумя или более аппаратами с вентиляторами типа ВГ. Применение нескольких вентиляторов обеспечивает снижение электропотребления холодильных установок при $t_{\text{вн}}$ ниже 20°C . Аппараты с верхним расположением вентиляторов рекомендуются для южных районов страны, для северных районов предлагается классическая компоновка аппарата с установкой вентиляторов под пучком труб. При проектировании аппаратов следует принимать подогрев воздуха $3...8^{\circ}\text{C}$ (меньшие значения относятся к аппаратам с количеством рядов по ходу воздуха $Z_{\text{р}} = 5...6$); разность между температурой конденсации хладагента и температурой воздуха, выходящего из аппарата, равной $3...4^{\circ}\text{C}$, $q_{\text{н}} = 200...250 \text{ Вт}/\text{м}^2$.

Воздухоохладители с литым оребрением для отвода небольших тепловых потоков (до 40 кВт) целесообразно конструировать в виде подвесных аппаратов, которые не занимают полезного грузового объема. При их установке упрощаются система распределения воздуха в охлаждаемом помещении и схема разводки трубопроводов. В более крупных камерах холодильной обработки (при отводе тепловых потоков свыше 80 кВт) монтируют постаментные аппараты. В камерах с интенсивным влаговыведением и инеобразованием теплообменные поверхности комплектуются трубами с шагом ребер равным 15, 20 и 30 мм ($D_{\text{вн}}$ основной трубы — 20 и 32 мм). При проектировании камерного оборудования подохлаждение воздуха можно принимать $3...4^{\circ}\text{C}$, для камер с повышенной влажностью воздуха — $2,0...2,5^{\circ}\text{C}$ при θ равном $5...7^{\circ}\text{C}$ и $q_n = 180...200 \text{ Вт/м}^2$.

Оттаивание аппаратов производится горячими парами хладагента с одновременным орошением теплой водой; талые воды отводятся через патрубок, расположенный в нижней части поддона.

Применение воздухоохладителей рассмотренных выше конструкций дает возможность поддерживать более высокие t_0 хладагента, при этом расход электроэнергии на выработку холода уменьшается на 7...10%.

Предложен способ определения оптимальных режимов работы воздухоохладителей (подвешенного ВО-БЛП-100 и постаментного ВО-БЛП-450): цикл холодильной обработки мясных продуктов разделен на отдельные отрезки времени, в пределах которых q_n принята постоянной. Задаваясь различными значениями $W_{\text{в}}$, получен минимум Π_3 на каждом выделяемом отрезке времени. Фиксированным и постоянным во времени является также $t_{\text{в.ср}}$.

Аппараты с переменными U и S смогут найти широкое применение при программном методе обработки мясных полутуш в поточных камерах или туннелях охлаждения.

Разработана методика определения геометрических параметров конденсаторов воздушного охлаждения и Π_3 при их эксплуатации и составлен алгоритм выбора оптимальной компоновки пучка труб, который реализован в программе "ОПТИМА" на ЭЦВМ. В качестве примера определены конструктивные и технологические данные, обеспечивающие минимум эксплуатационных затрат и капиталовложений в установленный срок окупаемости для аппарата, мощностью 1 МВт.

Технико-экономический анализ работы конденсаторного отделения, оборудованного аппаратами водяного, испарительного и воздушного охлаждения, проведенный по Π_3 , показал, что воздушные конденсаторы следует применять преимущественно в местах, где остро ощущается дефицит воды или используемая вода содержит большое количество солей и других примесей, а также в районах, где стоимость 1 м^3 воды превышает более чем вдвое среднюю стоимость 1 кВт.ч электроэнергии.

Использование конденсаторов позволяет экономить воду и снизить электропотребление на 25...30%. Для ряда районов страны определены режимы эксплуатации оборудования и построены диаграммы работы нагревателей воздуха в конденсаторных отделениях в зависимости от $t_{\text{в.н}}$.

Для определения оптимальной компоновки трубчато-ребристой поверхности, состоящей из теплообменных элементов с переменным профилем ребра, из которых изготавливают аппараты в промышленных условиях, были проведены экспериментальные исследования при различных ориентациях труб относительно движения потока воздуха. Для серийного производства теплообменников по лучшим тепловым и аэродинамическим характеристикам рекомендован пучок с расположением линии максимальной толщины ребра параллельно направлению потока воздуха и перпендикулярно ему.

В процессе проведения исследований оценивалась степень точности результатов опытов по определению средних квадратичных ошибок для отдельных значений критериев M_n , R_n , E_n . После обработки

расчетных данных погрешности составили соответственно 6,1%, 8,8% и 13,2%.

Глава 7 "Разработка мероприятий по сбережению материальных, энергетических и водных ресурсов при использовании холодильных установок, обеспечивающих реализацию процессов пищевой технологии".

Опыт эксплуатации воздушных конденсаторов аммиака показал, что применение их позволяет значительно повысить эффективность процессов холодильной обработки, снизить среднегодовую t_k , а следовательно, уменьшить среднегодовые энергозатраты циклов одно- и двухступенчатых установок. В осенне-зимний и весенний периоды года компрессионные холодильные установки ($t_0 = 0...-12^{\circ}\text{C}$) с насосно-циркуляционными системами, применяемые при охлаждении овощей, мяса, рыбы, при хранении охлажденных пищевых продуктов, на молочных и сыродельных заводах, на предприятиях консервной промышленности, а также при промышленном кондиционировании воздуха и производстве минеральных удобрений, можно перевести на работу без компрессоров, по прямому циклу; при этом в действующую схему включается барорегулирующий вентиль на линии выхода агента из испарителя. При дросселировании понижается его давление от P_0 до P_k , последнее зависит от $t_{a,n}$. Сконденсированный хладагент после линейного ресивера, минуя жидкостный регулирующий вентиль, насосом подается в испаритель, при этом его давление повышается (от P_k до P_0). Вместо барорегулирующего вентиля возможна установка детандера, позволяющего вырабатывать энергию при эксплуатации. Тогда агент после испарителя, пройдя дополнительный теплообменник и нагревшись на $20...30^{\circ}\text{C}$, поступает в детандер, где при расширении давление его понижается от P_0 до P_k . Затем цикл осуществляется по рассмотренной выше схеме. Экономия электроэнергии при работе холодильных установок по прямым циклам составляет 95%.

Работа двухступенчатой холодильной установки при пониженных

$t_{a,n}$ осуществляется следующим образом: сжатый в низкой ступени компрессора агент поступает непосредственно в конденсатор ($P_k \approx P_{np}$). При эксплуатации этих установок электрозатраты уменьшаются вдвое. Проведенные расчеты показали, что реализация рациональных режимов работы, позволяющих использовать естественные энергоресурсы, способствует получению искусственного холода наиболее экономичным путем. Расход электроэнергии в зависимости от климатической зоны снижается на $778,6...168,9$ кВт.ч на одну тонну при хранении рыбы и на $361,9...7,8$ кВт.ч – при холодильной обработке одной тонны продукции: на $29,4...12\%$ для одноступенчатых установок и на $30,6...11,8\%$ – для двухступенчатых. Минимальные затраты также получены для условий работы этих установок (снижение затрат на $20...11$ тыс. рублей составляет $13,0...9,6\%$). Энергетический коэффициент увеличивается для одноступенчатых установок на $41,6...14,3\%$, для двухступенчатых – на $44,3...14,1\%$. Кроме того для последних холодильный коэффициент цикла увеличивается с 3,69 до 4,18.

Применение воздушных теплообменников вместо водяных значительно сокращает расходы пресной воды, но не позволяет отказаться от ее использования полностью. Так, охлаждение поршневой и клапанной группы компрессора, масляных холодильников, а также охлаждение сжатого воздуха между ступенями компрессора целесообразно осуществлять промежуточным теплоносителем (водой). Традиционно охлаждение циркуляционной воды происходит в системах обратного водоснабжения (градириях, брызгальных бассейнах и др.). Существенные недостатки этих систем могут быть устранены при применении закрытых градирих ("сухих" градирих), в качестве которых можно использовать теплообменники с воздушным охлаждением. Причем, в осенне-зимний период времени возможно отключение нагнетателей воздуха в зависимости от $t_{a,n}$. При эксплуатации систем в период пиковых тепловых потоков следует предусмотреть адiabатное охлаждение воздуха. Тогда даже при $t_{a,n} = 30...35^{\circ}\text{C}$ можно

охлаждать воду до $28...30^{\circ}\text{C}$. Чтобы избежать загрязнения внутренней теплообменной поверхности, системы можно заполнять химически очищенной водой или дистиллятом. Конструкция теплообменника "сухая" градирня аналогична конструкции конденсатора с воздушным охлаждением. Однако для увеличения скорости воды в трубках аппарата оребренные батареи выполняются не коллекторного типа, а змеевикового.

При производстве минеральных удобрений широко применяются воздушные аппараты. Предложены конструкции охладителей и конденсаторов, поверхность которых рассчитана с учетом коэффициента теплоотдачи со стороны воздуха, определенного по зависимости $\alpha_s = 6,4 (W_s \rho_s)^{0,83}$, где $W_s \rho_s = 6...13 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$.

Эти предложения направлены на обережение материальных ресурсов и экономию дефицитных цветных металлов и нержавеющей стали.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Интенсификация технологических процессов холодильной обработки мясной и растительной продукции была обеспечена использованием разработанного эффективного теплообменного оборудования: цикл замораживания парного мяса составил $22...28$ часов, при домораживании — $8...18$ часов; основное количество инея оседало в первую половину цикла, максимальная скорость роста его составляла $0,35 \text{ мм/ч}$, часть инея (до 25%) выносилась из аппарата, поэтому оттаивание теплообменной поверхности возможно производить только в конце цикла обработки (при однофазном замораживании мяса); в последний период обработки уменьшение расхода воздуха из-за увеличенного аэродинамического сопротивления не ухудшало условий теплообмена (средняя температура воздуха в камере составляла $-19,5...-27,0^{\circ}\text{C}$, в штабеле — $-7,25^{\circ}\text{C}$, $q_{\text{н}}$ в конце цикла обработки уменьшалась до $90...100 \text{ Вт/м}^2$); снижение массы продуктов было меньше нормативных ($1,58...1,61\%$ при обработке мяса и $2,96...3,03\%$ — при обработке картофеля); дегустиция мясного бульона

показала, что существенного различия во вкусе и качестве замороженного мяса нет; расход металла (стальных труб) на приборы охлаждения при обработке одной тонны продукции сокращался на 40%.

2. Система охлаждения для фруктоовощехранилищ с активным вентилированием, напольной сетью воздухоподдачи, с отдельным отводом Q через наружные ограждения и аппаратом из литой трубчато-ребристой поверхности снижает потери массы хранимой продукции на 24% и повышает ее качество на 37% по сравнению со стандартным оборудованием.

3. Использование литых теплообменных поверхностей в конструкциях аппаратов привело к повышению эффективности холодильных установок предприятий АПК, при этом Q увеличился на 35% для конденсаторов и на 80% — для воздухоохладителей по сравнению с серийными аппаратами равной площади поверхности охлаждения; эксплуатационные затраты снизились на 20%. Кроме того, достигнуто снижение материалоемкости на 40%, энергопотребления — на 30%, расхода пресной воды — на 95...98%.

Созданы теплообменные поверхности, которые обладают высокими ψ ($4,19...32,90$) и E ($0,92...0,98$), компактностью (до $366 \text{ м}^2/\text{м}^3$); энергетический коэффициент их на 26...43% выше, чем у наиболее развитых теплообменных поверхностей, освоенных отечественной промышленностью. Разработанные модули оребренных элементов позволяют унифицировать технологическую оснастку для процесса производства трубчато-ребристых поверхностей.

Разработано и апробировано технологическое оборудование на литейных машинах отечественного производства, позволяющее изготавливать теплообменные поверхности различных геометрических размеров, профилей и форм ребристых элементов по третьему классу точности и чистотой обработки поверхности $Ra = 0,63$. Смазка рабочих поверхностей формообразующих вкладышей и литниковой втулки, приготовленная

на графитовой основе из трансформаторного масла и масла "ВАПОР", материал, выбранный для основных деталей пресс-формы, конструкция матриц с необходимыми литейными уклонами обеспечили хорошее заполнение полости формы без опавов и недоливов, удаление газов из полости формы, равномерное заполнение всех ребристых элементов, хороший съём отливки, минимальный расход расплава на литники и простоту зачистки отлитой детали. Для производства трубчато-ребристых поверхностей не требовалось дефицитных толстостенных алюминиевых труб, тонколистовой стали, а использовался вторичный литейный алюминий, содержащий 7...12% кремния, с хорошими механическими свойствами, достаточной текучестью, обладающий минимальной усадкой, высокой теплопроводностью, низкой стоимостью, который обусловил высокие энергетические и эксплуатационные характеристики трубчато-ребристой поверхности. Кроме того, кристаллизующийся оплав, плотно охватывая основную трубу, практически ликвидировал воздушную прослойку между трубой и ребрением, а наружная ребристая поверхность покрывалась прочной оксидной пленкой, которая создавала высокую устойчивость против коррозии. При производстве теплообменных поверхностей обеспечено повышение производительности труда на 6,7%, снижение трудоемкости - на 18,6% по сравнению с применяемыми в промышленности способами изготовления трубчато-ребристых поверхностей.

4. В результате комплексных исследований установлены общие закономерности $Nu = f(Re)$ и $Eu = f(Re)$, описывающие процессы теплообмена и аэродинамики в пучках труб для основных режимов работы теплообменной аппаратуры при холодильной обработке продуктов. Создание методики и стенды для исследования процессов теплообмена являются оригинальными и позволили установить зависимости для расчёта $\delta_{ин}$, осевшего на охлаждаемую поверхность воздухоохладителей, и E оросительного устройства конденсатора.

Характер и динамика процесса осаждения инея на разных по глуби-

не рядах труб объяснялись существенным охлаждением воздуха при его контакте с первыми рядами пучка труб, вследствие высокой эффективности процесса теплообмена (охлаждением воздуха в пограничном слое у поверхности теплообмена), образованием кристаллов льда в потоке воздуха, которые не осаждались на ребрах и трубах, а уносились в охлаждаемое помещение. В аппарате с переменным проходным сечением осаждение инея происходило равномерно на всех рядах. Общая продолжительность оттаивания, включая осушение поверхности, составляла 25...30 мин. Рост аэродинамического сопротивления пучков труб определялся динамикой осаждения инея. Характер зависимости $\alpha_{лр}$ свидетельствовал о некоторой интенсификации теплообмена в начальный период вследствие эффективного массопереноса и резкого снижения θ_b . Уменьшение $\alpha_{лр}$ связано с нарастанием снежного покрова. Средние значения K разработанных воздухоохладителей в 1,5...2,0 раза больше /17,5...29,5 Вт/(м²·К)/ по сравнению с существующими в промышленности образцами.

Термографический и термоэлектрический методы определения $\alpha_{л}$ подтвердили, что в диапазоне $W_b = 6,1...20,0$ м/с максимальные Q находятся в зоне ребра $\theta = 60...120^\circ$ вследствие высоких значений температурных напоров и интенсивной теплоотдачи.

5. Анализ аналитических зависимостей для определения Pe позволил оценить влияние $N_{кл}$ при изменении $D_{вн}$, $D_{н}$, $D_{тр}$, δ_r и U для различных материалов (стальное ребро и труба, алюминиевое ребро и стальная труба) и при $\alpha_n = 10, 50, 120$ Вт/(м²·К).

Для условий адиабатного охлаждения воздуха при помощи математической модели определены размеры капли (10, 20 мкм) и расстояние установки диска оросительного устройства от теплообменной поверхности воздушного аппарата (130 и 310 мм).

6. Разработан новый подход к проблеме интенсификации процессов теплообмена: повышение эффективности биметаллической теплообменной

поверхности обосновано увеличением площади зоны контакта ребристого элемента (алюминиевых ребра и наплавки) и основы (стальной трубы), а следовательно, возрастанием величины $\theta_{\text{ср}} = t_{\text{р.эл.}} - t_{\text{в.ср}}$, повышением Q ; радиальные ребра эллиптической формы и переменного сечения рекомендуются для конденсаторов воздушного охлаждения, причем эффективность этих поверхностей на 6...10% выше, чем у цилиндрических ребер трапециевидного профиля, применяемых для воздухоохладителей.

7. Проведенные исследования позволили рекомендовать для режимов холодильной обработки пищевых продуктов градации подвесных и постаментных воздухоохладителей горизонтального и вертикального типов с $F = 50, 65, 70, 80, 85, 100, 150, 250, 300, 350, 400, 450, 500, 550$ и 600 м^2 для программного метода обработки мясных полутоп в поточных камерах или туннелях охлаждения - аппарат с переменным межреберным каналом для прохода воздуха; в зависимости от назначения объекта искусственного холода и климатического района обосновать выбор рационального способа отвода тепла конденсации и конструкции пучка труб и вентиляторного узла. Предложены горизонтальные и вертикальные секции и модули батарей воздушных конденсаторов $F = 700, 850, 1000, 1500, 2100, 2500, 3000, 3300$ и 4000 м^2 .

8. Опытная эксплуатация аппаратов в условиях агрессивных сред показала возможность увеличения в два раза сроков работы конденсаторов без капитальных и текущих ремонтов по сравнению с промышленными образцами аппаратов.

9. Приемочные (межведомственные и ведомственные) испытания, проведенные на девяти объектах искусственного холода предприятий мясной промышленности, торговли и производства минеральных удобрений позволили рекомендовать подвесной и постаментный воздухоохладители и конденсаторы с боковым и нижним расположением вентиляторов в серийное производство; предложить рациональные режимы эксплуатации теплооб-

менного оборудования, позволяющие повысить t_0 на 2...3°C и уменьшить электропотребление на 12,0...29,4% для одноступенчатых и на 11,8...30,6% - для двухступенчатых установок или на 168,9...778,6 кВт.ч на одну тонну при хранении рыбы, 7,8...361,9 кВт.ч при холодильной обработке одной тонны продуктов; осуществить дальнейшее использование трубчато-ребристых поверхностей в других областях техники, обеспечивающих замену цветных металлов, экономию дефицитных материалов;

10. Реализация результатов работы позволила автору научно обосновать, теоретически обобщить и решить проблему повышения эффективности технологических процессов при холодильной обработке пищевых продуктов, что подтверждено актами внедрения с общим экономическим эффектом 1,7 млн.рублей (с учетом долевого участия вуза - 0,98 млн.рублей).

Основные публикации по теме диссертации

1. Аммиачные холодильные установки с воздушными конденсаторами. Чепурненко В.П., Ноур А.И., Еркин А.П., Паланто Ю.А., Яшков Б.В. - Холодильная техника, 1977, № 2, с.13-15.
2. А.с.601537 (СССР) Способ работы холодильной установки /Одесский технологический институт холодильной промышленности: Авт.изобрет. О.В.Парижский, В.П.Чепурненко, В.В.Лионин, Л.Ф.Лагота.
3. А.с.737725 (СССР) Способ работы холодильной установки /Одесский технологический институт холодильной промышленности: Авт.изобрет. О.В.Парижский, В.П.Чепурненко, В.В.Лионин, Л.Ф.Лагота.
4. Выбор скорости воздуха в аппаратах с воздушным охлаждением. Чепурненко В.П., Лионин В.В., Кроль В.М., Лагутин А.Е. - В сб.: Холодильная техника и технология. - Киев: изд-во "Техніка", 1979, вып.28, с.64-66.
5. Игнатенко М.М., Лагутин А.Е., Чепурненко В.П. Расчет тепловой

- эффективности эллиптического ребра. - В об.: Холодильная техника и технология. - Киев: изд-во "Техніка", 1985, вып.40, с.16-18.
6. Исследование постаментных воздухоохладителей из литой биметаллической оребренной поверхности. Чепурненко В.П., Хмаладзе О.Ш., Лагота Л.Ф., Лагутин А.Е., Гоголь Н.И., Мельников П.И. - В об.: Холодильная техника и технология, -Киев: изд-во "Техніка", 1982, вып.35, с.18-22.
 7. Исследование современных охлаждающих систем распределительных холодильников, оборудованных винтовыми компрессорами и воздушными конденсаторами. Чепурненко В.П., Ноур А.И., Розенберг А.С., Тимченко Е.Л. Реферативная информация о научно-исследовательских работах в вузах УССР (пищевая промышленность), 1978, вып.13, с.34.
 8. Исследование температурных полей теплообменных элементов. Чепурненко В.П., Цыкало А.Л., Лисин В.В., Лагутин А.Е., Някина Е.Е. - Известия вузов СССР, Энергетика, 1979, № 8, с.113-117.
 9. Конденсатор воздушного охлаждения площадью поверхности теплообмена 4000 м^2 (КВ0-4000). Чепурненко В.П., Лагота Л.Ф., Ефанов М.В., Бельченко Е.Н., Мицкевич П.К. Информационный листок № 83-60, Одесский межотраслевой территориальный центр научно-технической информации и пропаганды, 1983, - 4.с.
 10. Конденсатор аммиака с воздушным охлаждением. Чепурненко В.П., Лисин В.В., Ноур А.И., Лагота Л.Ф. Информационный листок № 200-78, Одесский межотраслевой территориальный центр научно-технической информации и пропаганды, 1978, - 4.с.
 11. Монтеагудо Гарсиа, Чепурненко В.П., Д.Кинтеро Кабрера Исследования охлаждающей системы камер фруктоовощехранилищ для тропических условий. - В об.: Холодильная техника и технология. - Киев: изд-во "Техніка", 1982, вып.34, с.126-130.
 12. Охлаждение воздуха перед конденсаторами холодильных установок.

- Стральчук О.Б., Чепурненко В.П., Русов Е.Х., Ноур А.И., Ларьяновский С.Ю., Черкас Е.А. - В об.: Холодильная техника и технология. -Киев: изд-во "Техніка", 1977, вып.25, с.24-26.
13. Подвесные воздухоохладители типа ВОП-ЛП с литой биметаллической поверхностью. Чепурненко В.П., Хмаладзе О.Ш., Лагота Л.Ф., Мельников П.И. Информационный листок № 81-26, Одесский межотраслевой территориальный центр научно-технической информации и пропаганды, 1981, - 4.с.
 14. Применение аппаратов воздушного охлаждения в качестве конденсаторов аммиака крупных холодильных установок. Чепурненко В.П., Лисин В.В., Лагота Л.Ф., Гоголь Н.И. - Химическое и нефтяное машиностроение, 1976, № 1, с.17-18.
 15. Разработка холодильных комплексов, использующих естественные энергоресурсы. Чумак И.Г., Чепурненко В.П., Лагота Л.Ф., Шевченко В.З. - Холодильная промышленность и транспорт. Экспресс-информация, вып.6, ЦНИИТЭМасомолпром СССР, М., 1982, с.11-13.
 16. Расчет конденсаторов аммиака с воздушным охлаждением. Лисин В.В., Чепурненко В.П., Парижский О.В., Лагота Л.Ф. - В об.: Холодильная техника и технология. - Киев: изд-во "Техніка", 1981, вып.32, с.77-82.
 17. Результаты исследований воздушных конденсаторов. Чепурненко В.П., Лагота Л.Ф., Лагутин А.Е., Гоголь Н.И., Ефанов М.В., Ноур А.И. - В об.: Холодильная техника и технология. - Киев: изд-во "Техніка", 1981, вып.33, с.18-22.
 18. Установление норм естественной убыли для камер хранения мороженого мяса в холодильниках. Чулкин С.Г., Чепурненко В.П., Балабан Т.Н., Бушта И.В. Реферативная информация о научно-исследовательских работах в вузах УССР (пищевая промышленность), вып.13, 1978, с.34-35.
 19. Хмаладзе О.Ш., Чепурненко В.П., Влияние кинееобразования на вы-

- бор конструктивных параметров воздухоохладителей. - Холодильная техника, 1982, № 9, с.29-32.
20. Чепурненко В.П. Эффективные теплообменные аппараты для производства искусственного холода. - М.: Обзорная информация ЦНИИТИ мясомолпрома СССР, 1982, - 29 с.
 21. Чепурненко В.П., Гоголь Н.И., Хмаладзе О.Ш. Усовершенствованный технологический процесс опытно-промышленного производства теплообменных биметаллических ребристых элементов. Информационный листок № 83-40, Одесский межотраслевой территориальный центр научно-технической информации и пропаганды, 1983, - 4 с.
 22. Чепурненко В.П., Кириллов В.Х., Димов М.М. Расчет устройств для обработки воздуха перед воздушными конденсаторами холодильных установок. - В сб.: Холодильная техника и технология. - Киев: изд-во "Техніка", 1978, вып.26, с.89-94.
 23. Чепурненко В.П., Комаров В.З., Компанец А.М. Сравнение эффективности ребристых элементов с витыми и литыми ребрами. - В сб.: Холодильная техника и технология. - Киев: изд-во "Техніка", 1969, вып.8, с.94-96.
 24. Чепурненко В.П., Лисин В.В. Исследование теплообмена в пучках из литых ребристых труб. - Холодильная техника, 1976, № 9, с.25-27.
 25. Чепурненко В.П., Лисин В.В., Гоголь Н.И. Сопоставление конденсаторов аммиака с воздушным охлаждением. - В сб.: Холодильная техника и технология. - Киев: изд-во "Техніка", 1978, вып.26, с.86-89.
 26. Чепурненко В.П., Лисин В.В., Лагутин А.Е. Влияние неравномерности коэффициентов теплоотдачи на эффективность ребристого элемента. - В сб.: Холодильная техника и технология. - Киев: изд-во "Техніка", 1979, вып.29, с.19-21.

27. Чепурненко В.П., Монтеатудо Гарсиа Исследование охлаждающей системы камер холодильников для тропических условий. - В сб.: Холодильная техника и технология. - Киев: изд-во "Техніка", 1980, вып.30, с.56-59.
28. Чепурненко В.П., Хмаладзе О.Ш., Мельников П.И. Исследование теплообмена в воздухоохладителях, используемых для холодильной обработки продуктов. - В сб.: Холодильная техника и технология. - Киев: изд-во "Техніка", 1983, вып.36, с.124-128.
29. Чумак И.Г., Чепурненко В.П., Чуклин С.Г. Холодильные установки. - М.: Легкая и пищевая пром-сть, 1981. - 344 с.
30. Estudio de la transferencia de calor en elementos de evaporadores. Remedios, H.J., Cherpurnenko, V.P., Rusov, E.J., Lagutin A.E. Cadena frigorifica Cubana, 1977, № I, p.II-I7.
31. Influencia del perfil y el material de la aleta sobre el intercambio de calor por conveccion. Cherpurnenko V.P., Tsikalov A.L., Lagutin A.E., Diego Quintero Cabrera. Ingenieria energetica, № 2, Agosto de 1981, La Habana, Cuba, p.127-134.
32. Jose A. Alonso Gonzalez, Hector J. Remedios Carbajales, Victor Cherpurnenko. Investigacion del coeficiente de transferencia de calor superficial en haz de tubos. Ingenieria energetica, № 5, Noviembre de 1979, La Habana, Cuba, p.5-10.
33. Manuel Monteagudo Garcia, Cherpurnenko, V.P. Estudio de las camaras para productos agricolas frescos. Ingenieria energetica, Agosto de 1980 - La Habana, Cuba, p.37-43.
34. Remedios, H.J., Cherpurnenko, V.P. Investigation of the refrigeration installations for tropicals conditions. - Bulletin IIR, 1975, tome LV, № 3, p.726-728.
35. The characteristics of foodstuffs freezing by air turborefrigerating machines. Martynovsky, V.S., Bondarenko, L.F., Cherpurnenko, V.P., Nour, A.I., Ukrainets, G.A. - IIR Annexe, № 3, Commissions II, IV, V, VI, p.91-96.

Условные обозначения

$Пк$ - показатель качества; $Пз$ - приведенные затраты; C, c - коэффициент сопротивления, стоимость, концентрация; D, d - диаметр, коэффициент диффузии; E - коэффициент эффективности; F - площадь поверхности; G, g - массовый расход, масса; M - молекулярная масса; N - мощность; P, p - давление, парциальное давление; Q, q - тепловой поток, плотность теплового потока; γ - сопротивление, радиус; S - шаг труб; T, t - температура, срок окупаемости; U - шаг ребер; W - скорость движения; Z - число рядов; α - коэффициент теплоотдачи; δ - толщина; Δp - перепад давления; θ - температура, температурный напор, угол; λ - коэффициент теплопроводности; μ - вязкость; ν - коэффициент кинематической вязкости; ρ - плотность; τ - время; φ - коэффициент оребрения, увеличения поверхности, относительная влажность воздуха.

Безразмерные комплексы

Eu - критерий Эйлера; Nu - критерий Нуссельта; Re - критерий Рейнольдса.

Индексы

ал - алюминиевая наплавка; в - вершина, воздух; вл - вода; вн - внутреннее; ин - иной; к - камера, конденсация, конечное, контактное; кр - круглое; л - линейное, локальный; м - мокрый; мак - максимум; н - наружное, насыщение, начальное; о - кипение, основание; п - поверхность, поперечный; пер - переменный; пр - продольный, приведенный, промежуточный; р - ребро, ребристый; ор - среда, средний; тр - труба; эл - элемент; элл - эллиптическое.

