

На правах рукописи

Лавров Николай Алексеевич

УДК 621.59

**Многоуровневая система моделирования нестационарных и
меняющихся режимов работы низкотемпературных
установок**

Специальность 05.04.03 – Машины и аппараты, процессы холодильной и
криогенной техники, системы
кондиционирования и жизнеобеспечения

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук



Москва – 2013

Официальные оппоненты:

доктор технических наук,
профессор

Бабакин Борис Сергеевич,
заведующий секцией «Холодильная
техника» каф. «Теплотехнологии,
холодильные системы и энергосбережение»
Технологического института МГУ Пищевых
производств

доктор технических наук
профессор

Кириллов Вадим Васильевич,
профессор каф. «Химии и микробиологии»
Института холода и биотехнологий ИТМО

доктор технических наук
профессор

Сапожников Владимир Борисович,
генеральный директор ООО НТВЦ
«ЭДУКОН»

Ведущая организация:

Открытое акционерное общество
криогенного машиностроения
(ОАО Криогенмаш)



Защита диссертации состоится 12 февраля 2014 г. в 14 час 30 мин в конференц-зале 314э на заседании диссертационного Совета Д.212.141.16 при ФГБОУ ВПО МГТУ им. Н.Э. Баумана: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО МГТУ им. Н.Э. Баумана

Автореферат разослан «06» ноября 2013 г.

Отзывы и замечания по автореферату в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба высылать по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного Совета Д.212.141.16

Ученый секретарь
диссертационного Совета
кандидат технических наук, доцент

Колосов Михаил Анатольевич

2013

Общая характеристика работы

Актуальность проблемы. Охлаждение и отопгрев крупных криогенных установок таких, как воздухоразделительные установки, установки сжижения природного газа, рефрижераторы для сверхпроводящих систем, криотермовакуумных камер - имитаторов космического пространства характеризуются существенной продолжительностью, соизмеримой в некоторых случаях с рабочим временем работы. В связи с этим рациональная организация нестационарных процессов с целью сокращения времени и затрат энергии, обеспечения безаварийной работы имеет существенное значение. Нестационарные процессы перехода от одного установившегося режима работы низкотемпературной установки к другому часто имеют место при эксплуатации. Кроме этого, существуют специальные установки, предназначенные, например, для быстрого охлаждения и замораживания пищевых продуктов, в которых сами рабочие режимы являются нестационарными. Параметры низкотемпературных установок при их работе не всегда совпадают с проектными значениями и могут существенно изменяться в процессе эксплуатации. Происходит это из-за переменности внешней тепловой нагрузки, параметров входящих потоков в установку и нестабильности рабочих характеристик машин и аппаратов, из которых состоит установка. Поэтому рациональная эксплуатация установки в таких меняющихся режимах крайне необходима как для того, чтобы не уменьшалась холодопроизводительность или количество получаемых продуктов, так и для того, чтобы избежать возможности поломок машин и аппаратов данной установки при отклонении величин параметров за пределы допустимых значений.

Проведение полномасштабных экспериментальных исследований нестационарных и меняющихся процессов связано с большими затратами и порой технически затруднено. Поэтому исследование этих процессов и систем проводится большей частью методами математического моделирования с привлечением ограниченного объема экспериментальной информации.

Существует достаточно много различных программ по расчёту отдельных частей или в целом низкотемпературных установок определённого типа, а также вычислительных комплексов (ANSYS, HISYS, STARCD и др.), позволяющих математически моделировать разнообразные процессы в установках. Однако при моделировании сложных установок состыковать программы для отдельных частей, чтобы рассчитать всю установку, бывает достаточно сложно, а используемые вычислительные комплексы требуют адаптировать физическую модель к располагаемым вариантам этих комплексов. Использование сложных многомерных физических моделей требует мощного математического аппарата для их реализации, однако в большинстве инженерных задач без большой потери точности можно понизить мерность физической модели, что значительно облегчит решение задачи. Кроме этого на этапе создания физической модели необходимо оценить влияние разнообразных факторов на основной процесс, что позволит пренебречь некоторыми второстепенными процессами.

В связи с вышесказанным основной задачей данной работы является моделирование нестационарных и меняющихся процессов тепло- и массообмена в низкотемпературных установках и создание многоуровневой расчётной системы, реализация созданных моделей с помощью вычислительных программ с использованием ограниченного количества экспериментальных данных, а так же теоретическое исследование с помощью этих программ нестационарных и меняющихся режимов работы низкотемпературных установок. Работы в этом направлении были начаты автором с 1987 года на кафедре Э-4 «Холодильной и криогенной техники, систем кондиционирования и жизнеобеспечения» МГТУ им. Н.Э.Баумана и продолжают по настоящее время. Диссертационная работа обобщает более чем 25-летний теоретический и практический опыт, разнообразные исследования и разработки, выполненные непосредственно автором или с его непосредственным участием.

Цель работы заключается в развитие методов и способов моделирования нестационарных процессов тепло- и массообмена в низкотемпературных

установках и меняющихся режимов их работы, обобщении результатов расчётных и экспериментальных исследований.

Научная новизна работы

1. Впервые предложен конечно-разностный метод для решения систем уравнений, описывающих стационарные режимы работы теплообменников с учётом переменности теплофизических свойств на основе полученного аналитического решения внутри каждого шага разбиения по координате.
2. Предложена новая методика приближённого расчёта нестационарного режима работы теплообменного аппарата, позволяющая получать аналитические решения с учётом распределённости теплофизических параметров по координате и заданной степенью точности.
3. Впервые создана многоуровневая расчетная система с постепенным увеличением сложности используемых моделей для определения рациональных параметров работы низкотемпературных установок.
4. Предложен новый метод определения времени охлаждения объектов, в том числе и с фазовыми переходами, для оценки влияния различных факторов на данный процесс.
5. Разработана новая модель процессов охлаждения тел с внутренними каналами и переменным направлением движения теплоносителя, позволяющая получить рациональные значения расхода и целесообразное время реверсирования потока хладоносителя.
6. Впервые проведено исследование влияния испарения влаги на тепломассообмен при охлаждении и замораживании пищевых и биологических продуктов.
7. Впервые выполнен анализ основных механизмов процессов тепломассообмена при движении газовых пузырей в жидкости и создана методика расчета этих процессов для разных условий его проведения.

Практическая ценность работы

1. На основе физических и математических моделей, описывающих работу тепло- и массообменных аппаратов для техники низких температур, разработаны новые, рациональные и более точные методы расчёта стационарных и нестационарных режимов их работы.
2. На примере установки обратной конденсации азота разработана многоступенчатая расчетная система для рационального осуществления меняющихся режимов работы низкотемпературных установок и даны практические рекомендации.
3. Разработаны рекомендации по проведению процесса экономичного охлаждения изношенных автопокрышек потоком холодного воздуха как при реверсирования потока хладагента, так и без него. Даны рекомендации по величине массового расхода воздуха и периоду переключений потока.
4. Проведён анализ процессов тепломассообмена при охлаждении и замораживании пищевых продуктов и получены рекомендации по рациональной организации работы скороморозильных аппаратов для замораживания пищевых продуктов на основе анализа процессов тепломассообмена.
5. На основании результатов исследования механизмов переноса массы и теплоты при движении газовых пузырей в жидкости, разработаны методики для расчёта и проектирования, а так же организации работы установок для получения газопаровых смесей заданного состава, очистки жидкости от растворённого в них газа или для насыщения жидкостей растворёнными газами.

На защиту выносятся следующие положения

1. Моделирование работы теплообменных аппаратов при различном виде сопряжения с другими частями низкотемпературной установки.
2. Методология создания многоуровневой расчетной системы определения рациональных режимов работы низкотемпературных установок и результаты её использования.

3. Метод оценки влияния различных факторов, влияющих на процесс охлаждения объектов.
4. Моделирование процессов теплообмена в объектах, имеющих каналы для протекания хладагента, в том числе при изменении направления его движения.
5. Расчётные рекомендации по рациональному проведению процесса охлаждения изношенных автопокрышек потоком холодного воздуха из турбохолодильной машины с целью утилизации резины по криовзрывной технологии.
6. Анализ влияния испарения влаги на процесс охлаждения и замораживания пищевых продуктов, содержащих значительное количество влаги.
7. Оценка влияния основных механизмов для процессов переноса массы и теплоты при движении газовых пузырей через жидкость.
8. Методики расчёта и рекомендации для определения основных характеристик барботажных установок, предназначенных для очистки жидкости от растворённых в ней газов, насыщения газовых пузырей парами жидкости, насыщения жидкости газом из пузырей.

Апробация работы. Результаты данной работы докладывались и обсуждались на международных конференциях «Криогенная техника - науке и производству» (Москва, 1991 г.), International symposium heat transfer enhancement in power machinery (НТЕРМ'95) (Москва, 1995 г.), международном симпозиуме «Образование через науку» (Москва, Россия, 2005 г.), международной научной конференции «Холодильная и криогенная техника, промышленные газы, системы кондиционирования и жизнеобеспечения» (Москва, Россия, 2010 г.), Девятой научно-практической конференции «Криогенные технологии и оборудование. Перспективы развития» (Москва, Россия, 2012 г.), научных семинарах в Московском Государственном Техническом Университете им. Н.Э.Баумана на кафедре «Холодильной и криогенной техники, систем кондиционирования и жизнеобеспечения» в течение 1987-2013 гг.

Публикации. Общее количество работ, опубликованных по теме диссертации – 28, в том числе 21 статья в научных журналах, 2 статьи в сборниках научных трудов, 5 – докладов в трудах международных и российских конференций.

Личный вклад автора. Постановка научных задач теоретических, расчётных и экспериментальных исследований. Решение основных теоретических, методических, расчётных и практических вопросов, построение математических моделей и расчётных алгоритмов, расчёт установок и экспериментальных стендов, сбор, анализ и обработка информации. Автор разработал методики расчёта процессов тепло- и массообмена в различных низкотемпературных установках. Автору принадлежат расчётные алгоритмы и компьютерные программы по поверочному расчёту низкотемпературных установок и определения рациональных режимов их работы. Кроме этого, автор лично участвовал в экспериментальных исследованиях этих установок.

Внедрение. Результаты работы использованы для организации рационального ведения процессов охлаждения и неноминальной работы установки обратной конденсации в НИИХИММАШ (г. Пересвет), скороморозильных установок для производства пельменей (г. Москва), газовом реакторе AGR фирмы PRAXAIR (г. Территаун, США), установки РУНА-20 для охлаждения старых автопокрышек для их последующей деструкции ЗАО «НПФ «Новотех» (г. Владимир), а так же в учебном процессе кафедры «Холодильной и криогенной техники, систем кондиционирования и жизнеобеспечения» Московского Государственного Технического Университета им. Н.Э.Баумана.

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, пяти глав, списка использованной литературы, из 262 наименований, и содержит 294 стр. основного текста, в том числе 82 рисунков и 5 таблиц.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность и практическая значимость рассматриваемого научного направления, сформулирована цель диссертационной

работы, дано представление об её структуре, перечислены основные поставленные и решенные в ней задачи.

В первой главе подробно рассмотрено моделирование процессов теплообмена в низкотемпературных установках, в частности моделирование работы теплообменных аппаратов и установок, состоящих в основном из теплообменников. Для описания теплового взаимодействия между потоком и стенкой используется следующая система уравнений:

$$\begin{cases} \rho_1 \frac{\partial h_1}{\partial \tau} + \rho_1 \operatorname{div}(\vec{v}_1 h_1) = \operatorname{div}(\lambda_1 \operatorname{grad} T_1) + q_1 \\ \rho_{cm} C_{cm} \frac{\partial T_{cm}}{\partial \tau} = \operatorname{div}(\lambda_{cm} \operatorname{grad} T_{cm}) + q_{cm} \\ \frac{\partial \rho_1}{\partial \tau} = -\operatorname{div}(\rho_1 \vec{v}_1) \\ \frac{\partial \vec{v}_1}{\partial \tau} + \vec{v}_1 \operatorname{div}(\vec{v}_1) + \frac{1}{\rho_1} \operatorname{grad} p_1 = -F_c \end{cases}$$

где C - теплоемкость, F_c - удельная сила сопротивления, T - температура, p - давление, q - плотность теплового потока, τ - время, v - линейная скорость, h - энтальпия, λ - коэффициент теплопроводности, ρ - плотность; индекс cm - относится к теплопередающей стенке, 1 - к потоку.

В разделе 1.1 проводится анализ различных моделей для теплового взаимодействия между потоком и стенкой, характеризующих конкретный тип теплообменного аппарата, которые являются основными частями большинства низкотемпературных установок, как наиболее инерционные в тепловом отношении звенья. Для существенно нестационарных процессов используются нестационарные модели, для квазистационарных процессов, например, переход установки от одного режима к другому, используются стационарные модели с переменностью во времени температур потоков, входящих в теплообменные аппараты. Для учёта переменности теплофизических свойств потоков используются различные методы расчёта, хотя некоторые из них могут привести к абсурдности получаемого результата, например, пересечение расчётных пространственных профилей температур прямого и обратного потоков.

В разделе 1.2 получено аналитическое решение для усредненных значений теплофизических параметров, исключающие появление таких результатов, имеют вид:

$$T_1(\bar{x}) = C_1 \exp(\lambda_1 \bar{x}) + C_2 \exp(\lambda_2 \bar{x}) - (\pm T_{\infty})$$

$$T_2(\bar{x}) = [C_1(\lambda_1 + N_1) \exp(\lambda_1 \bar{x}) + C_2(\lambda_2 + N_1) \exp(\lambda_2 \bar{x})] / N_1 \pm T_{\infty},$$

где T_{∞} - температура окружающей среды, $\lambda_{1,2}$ - характеристические числа, которые для прямоточного теплообменника:

$$\lambda_{1,2} = -0,5((N_1 + N_2 + N_0) \pm \sqrt{(N_1 - N_2 - N_0)^2 - 4N_1N_0})$$

и для противоточного теплообменника:

$$\lambda_{1,2} = -0,5((N_1 - N_2 - N_0) \pm \sqrt{(N_1 - N_2 - N_0)^2 + 4N_1N_0}),$$

где N_1 , N_2 , N_0 - числа NTU для прямого и обратного потоков и со стороны окружающей среды, $\bar{x}$ - безразмерная координата. Для трехпоточных теплообменников, в случае пренебрежения теплопритоком из окружающей среды, решение имеет вид:

$$T_1(\bar{x}) = C_1 \exp(\lambda_1 \bar{x}) + C_2 \exp(\lambda_2 \bar{x}) + C_3 \exp(\lambda_3 \bar{x}),$$

$$T_2(\bar{x}) = C_1 \exp(\lambda_1 \bar{x}) + C_2(N_2(\lambda_2 + N_1)) / (N_1(\lambda_2 + N_2)) \exp(\lambda_2 \bar{x}) + \\ + C_3(N_2(\lambda_3 + N_1)) / (N_1(\lambda_3 + N_2)) \exp(\lambda_3 \bar{x})$$

$$T_3(\bar{x}) = C_1 \exp(\lambda_1 \bar{x}) + C_2(\lambda_2 + N_1) / N_1 \exp(\lambda_2 \bar{x}) + C_3(\lambda_3 + N_1) / N_1 \exp(\lambda_3 \bar{x}).$$

Характеристические числа имеют следующие значения:

$$\lambda_1 = 0,$$

$$\lambda_{2,3} = -0,5((N_1 + N_2 - N_3 - N_4) \pm \sqrt{(N_1 + N_2 - N_3 - N_4)^2 - 4(N_1N_2 - N_1N_4 - N_2N_3)})$$

Для задач охлаждения и замораживания аналитические решения возможно получить только для одномерных тел и при упрощении температурного профиля.

Ценность аналитического решения - его "абсолютная" точность, что позволяет сравнивать с ним численные методы для оценки их точности для предельных задач. Недостаток - усреднение теплофизических свойств потоков.

В разделе 1.3 на основе аналитических решений для двухпоточного теплообменника изложен разработанный численный метод решения, при

котором длина теплообменной поверхности разбивается на несколько частей и внутри каждой части строятся аналитические решения, на основе которых получается численное решение с учетом переменности теплофизических свойств по координате. Данный метод решения позволяет избежать возможного пересечения расчётных профилей температур потоков.

В разделе 1.4 для решения систем уравнений, описывающих нестационарные режимы работы теплообменников, описан созданный метод аппроксимации профиля температур потоков по координате наперед заданной функцией, построенной на конечном числе опорных точек, температура в которых определяется в процессе решения. Усреднения теплофизических свойств по времени позволяет получить аналитическое решение с учётом изменения свойств по координате.

В разделе 1.5 показано, что безразмерные аналитические зависимости, используемые для определения коэффициентов теплоотдачи, позволяют получить удовлетворительные значения этих величин для потока, текущего в трубном пространстве. Но эти зависимости для межтрубного пространства витых теплообменников имеют достаточную погрешность вследствие возможных смещений зазоров между корпусом теплообменника и змеевика, а так же других неточностей изготовления. Поэтому для определения поправочных коэффициентов $\psi_\alpha = \frac{\alpha_{обр}}{\alpha_{расч}}$ при определении коэффициентов теплоотдачи в межтрубном пространстве $\alpha_{обр}$ относительно расчётных $\alpha_{обр}^{расч}$ используются расчётные зависимости для коэффициентов теплоотдачи в трубном пространстве $\alpha_{тр}$ и имеющиеся экспериментальные данные интегральных коэффициентов теплопередачи K_{Σ} по всей длине теплообменника L :

$$K_{\Sigma} = \frac{1}{L} \int_0^L \frac{\alpha_{тр} \Pi_{тр} \alpha_{обр}^{расч} \Pi_{обр} \psi_\alpha}{\alpha_{тр} \Pi_{тр} + \alpha_{обр}^{расч} \Pi_{обр} \psi_\alpha} dx.$$

Во второй главе на основе различных моделей работы теплообменных аппаратов создана расчетная система рационального ведения меняющихся

режимов работы низкотемпературных установок. Система строится на многоступенчатом принципе перехода от более простой к более сложной модели, когда в качестве начального приближения значений искомым неизвестных на текущей расчетной ступени используется результат, полученный на предыдущей ступени. В качестве средств регулирования используются соотношения расходов потоков по аппаратам установки.

В разделе 2.1 приведён литературный обзор, посвящённый моделированию нестационарных и меняющихся режимов работы низкотемпературных установок.

В разделе 2.2 изложены расчётные ступени и постановка задачи определения рационального ведения меняющихся режимов работы низкотемпературных установок.

В разделе 2.3 приводится описание установки обратной конденсации, для которой проводится апробация созданной расчётной системы. Данная установка используется для получения жидкого азота, необходимого для охлаждения термовакуумной камеры. Установка состоит из трех теплообменников, заключенных в одном корпусе, двух детандеров и вынесенного отдельно детандерного теплообменника (рис. 1). Регулирование осуществляется изменением количества прямого потока, идущего через детандеры и количества холодного газа, подаваемого в установку извне. Возможен случай выключения детандерного теплообменника, установленного между детандерами.

В разделе 2.4 описано использование ограниченного количества экспериментальных данных для определения соответствующих интерполяционных зависимостей для к.п.д. детандеров, средних коэффициентов теплопередачи и теплоотдачи по теплообменникам установки.

В разделе 2.5 приведено описание измерений температур, давлений, объёмных расходов потоков, а также вычисление погрешностей измерений и вычислений.

В разделе 2.6 изложена апробация созданных расчётных методов для расчёта теплообменных аппаратов и всей установки в целом. Проведено сравнение расчётных и экспериментальных значений температур потоков на

входе и выходе теплообменных аппаратов для стационарных и нестационарных режимов работы установки, которые показали достаточно хорошее совпадение, и позволяет использовать созданные расчётные методики для анализа работы установки обратной конденсации.

В разделе 2.7 рассмотрена первая ступень расчета, созданная на основе модели с сосредоточенными параметрами и косвенным учётом теплообмена через минимальные разности температур на концах теплообменных аппаратов.

В качестве целевой функции используется выражение для получаемой после дросселирования жидкости. Поскольку и система неравенств, и целевая функция являются линейными относительно искомых неизвестных, то решение получается методом линейного программирования, который не требует знания начального приближения искомых величин.

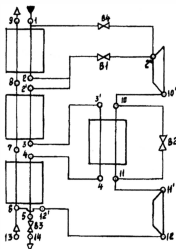
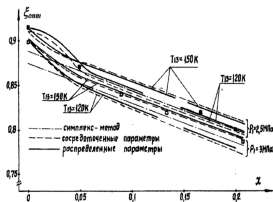


Рис. 1. Расчётная схема УОК



■ - 1,8...2,3 МПа и ○ - 2,6...3,2 МПа -
экспериментальные данные

Рис. 2. Расчётные зависимости относительного количества детандерного потока ξ_{omn} от относительного количества холодного азотного газа от объекта охлаждения χ при различных значениях давления прямого потока и температуры входящего холодного потока

В разделе 2.8 описана вторая и третья расчётные ступени, в которых применяется модель с сосредоточенными параметрами с учётом теплообмена через усреднённые коэффициенты теплопередачи. На второй ступени используется линейная целевая функция аналогичная первой ступени, на третьей ступени целевая функция нелинейная, т.к. используется более сложная зависимость количества полученной жидкости от искомых величин. Решение задачи в обоих случаях получается градиентным методом, в котором в качестве начальных значений неизвестных используются результаты предыдущей расчётной ступени.

В разделе 2.9 представлена четвертая ступень с использованием модели с распределёнными параметрами с учётом изменения теплофизических свойств потоков. Целевая функция аналогична третьей ступени. Для получения решения могут быть использованы градиентные методы определения искомых величин.

В разделе 2.10 изложен результат ряда поверочных расчетов работы установки обратной конденсации для заданных значений соотношений потоков. Проведенные расчеты показали, что с переходом от одной расчётной ступени к другой уменьшается область изменения параметров регулирования, где возможно получение решения вследствие увеличения ограничений, используемых в моделях более высоких ступеней. Результаты расчетов показали достаточно хорошее совпадение с экспериментальными значениями режимов работы установки обратной конденсации (рис. 2). На базе метода аппроксимации профиля температур потоков по координате предложены методика рационального проведения переходных режимов работы.

В разделе 2.11 представлены рекомендации по конструктивным изменениям, приводящим к улучшению проведения рабочих процессов, таких как охлаждение и отопление установки обратной конденсации, а также для режимов работы с отключением детандерного теплообменника.

В третьей главе приведены основные способы охлаждения тел и различные математические модели, используемые для их описания. Обычно для моделирования используются нестационарное уравнение теплопроводности для охлаждаемого тела и уравнение конвективного теплообмена для потока охлаждающей среды:

$$\begin{cases} C\rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = \nabla(\lambda \nabla T) \\ \rho_1 SC_{\rho_1} \frac{\partial T_1}{\partial \tau} + GC_{\rho_1} \frac{\partial T_1}{\partial f} = \alpha \Pi (T - T_1) \end{cases}$$

где C - теплоемкость, T - температура, τ - время, λ - коэффициент теплопроводности, ρ - плотность, G - массовый расход; f - координата в направлении движения потока α , Π - коэффициент и периметр теплоотдачи; индекс 1 - относится к охлаждающей среде, отсутствие индекса - к охлаждаемому телу.

В разделе 3.1 описаны основные способы охлаждения объектов, такие как погружной, циркуляционный и прокачной, особенности применения этих способов и описанием математической модели для описания теплообмена при использовании прокачной системы.

В разделе 3.2 даны оценки времени охлаждения объектов в прокачной системе до средней температуры, используя модели с сосредоточенными параметрами и по отдельности рассматривая три механизма передачи теплоты: конвективного теплообмена на поверхности, теплопроводности внутри объекта и ограниченного количества подаваемого хладоносителя. Данные интегральные оценки позволяют оценить вклад каждого из этих механизмов и общее время охлаждения объектов.

В разделе 3.3 приведена математическая модель теплообмена цилиндрического объекта, имеющего осевые каналы, через которые протекает хладоноситель. Модель состоит из двухмерного уравнения теплопроводности для каждого коаксиального цилиндра и одномерного уравнения конвективного теплообмена для потоков хладагента, текущих в цилиндрических зазорах между слоями. Процесс охлаждения моделируется двухмерными уравнениями нестационарной теплопроводности для охлаждаемого тела и уравнением сопряженного конвективного теплообмена для хладоносителя:

$$\begin{cases} \rho C \frac{\partial T_n}{\partial \tau} = \frac{1}{R_n} \frac{\partial}{\partial R} (\lambda R_n \frac{\partial T}{\partial R}) + \frac{\partial}{\partial Z} (\lambda \frac{\partial T}{\partial Z}), \\ \rho_l S_l C_p \frac{\partial \Theta_l}{\partial \tau} + G_l C_p \frac{\partial \Theta_l}{\partial z} = \alpha_{n,l} (T_l - \Theta_l) \end{cases},$$

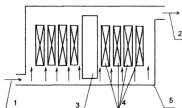
где T_n - температура n -ого слоя, ρ , C , λ - плотность, теплоемкость и теплопроводность материала слоя, τ - время, R_n - радиальная координата n -ого слоя, меняющаяся от внутреннего радиуса $R_{n,n}$ до наружного радиуса $R_{n,n}$, Z - осевая координата, ρ_l , C_p - плотность и теплоёмкость хладагента; S_n и G_n - площадь проходного сечения и массовый расход n -ого потока, находящегося между n -ым и $n+1$ -ым слоями.

Для решения использовался конечно-разностный способ решения систем нелинейных дифференциальных уравнений с применением метода «расщепления».

В разделе 3.4 рассмотрены особенности процесса охлаждения пакета использованных автопокрышек, необходимого для последующей криодеструкции с целью получения резины, и моделирование этого процесса. Блок автопокрышек находится в ёмкости, через которую прокачивается хладагент – холодный воздух из турбохолодильной машины МТХМ 1-21Р. Хладагент протекает через центральное отверстие в блоке, зазоры между слоями автопокрышек и зазор между внутренней поверхностью ёмкости и наружной поверхностью блока. В качестве расчетной геометрии реального блока автопокрышек (рис. 3) принимается составное однородное тело, состоящее из конечного числа коаксиальных слоёв. Используя разработанные модели, было сделано сопоставление расчетных и экспериментальных значений температуры потока хладагента на выходе из ёмкости, что показало адекватность созданной модели реальным процессам, на что так же указывает близость расчётных и экспериментальных временных зависимостей температуры в различных точках блока шин (рис. 4). Используя созданную расчётную модель, было определено наиболее рациональное значение расхода воздушного потока, необходимого для охлаждения (рис. 5). С помощью метода интегральных оценок был

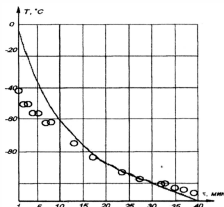
проанализирован характер зависимости средней температуры блока шин от времени охлаждения и величины расхода воздушного потока.

В разделе 3.5 изложено использование реверсирования потока холодного воздуха, т.е. перемена направления потока во время охлаждения для уменьшения разности температур в охлаждаемом теле. Проведённые расчёты показали, что наиболее целесообразно использовать либо частое реверсирование через короткие промежутки времени, что осуществить достаточно трудоёмко, либо использовать реверсирование в самом конце процесса охлаждения. Это позволит сократить время охлаждения до 8% (рис. 6).



1, 2 – вход и выход хладагента из воздушной холодильной машины, 3 – сердечник;
4 – коаксиальные слои блока

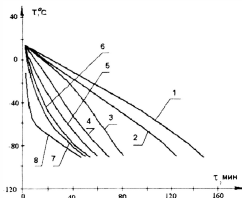
Рис.3. Расчётная схема для моделирования процесса охлаждения брикетов автопокрышек



— расчётная зависимость,
о – экспериментальные данные

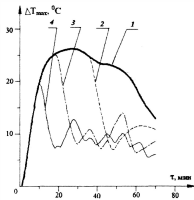
Рис.4. Временная зависимость температуры в 7-ой точке блока шин

В четвёртой главе представлено исследование процессов охлаждения и замораживания пищевых продуктов в холодильных или морозильных камерах, а так же в скороморозильных аппаратах, что необходимо для проектирования холодильного оборудования и рациональной организации технологических процессов.



1 - 0,1 кг/с; 2 - 0,2 кг/с; 3 - 0,25 кг/с; 4 - 0,3 кг/с; 5 - 0,5 кг/с; 6 - 0,75 кг/с; 7 - 1 кг/с; 8 - 10 кг/с

Рис. 5. Временная зависимость средней температуры блока шин при различных значениях массового расхода потока хладагента



1 - без реверсирования; 2 - реверс через 35 минут; 3 - через 17,5 минут; 4 - через 8,75 минут

Рис. 6. Зависимость максимального перепада температур в блоке шин от времени начала многократного реверсирования

В разделе 4.1 рассматриваются особенности моделирования процессов охлаждения и замораживания пищевых продуктов, которые описываются системой уравнений Стефана:

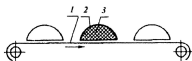
$$\begin{cases} C\rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = \nabla(\lambda \nabla T) \\ \lambda_s \frac{\partial T}{\partial X} \Big|_{X=Z+0} - \lambda_l \frac{\partial T}{\partial X} \Big|_{X=Z-0} = L\rho_s \frac{\partial Z}{\partial \tau}, T|_{X=Z} = T_L, \end{cases}$$

где: T - температура; τ - время; C , ρ , λ - теплоемкость, плотность и коэффициент теплопроводности тела; L , T_L - теплота и температура затвердевания; X - координата в направлении оси, перпендикулярной поверхности затвердевания; Z - координата поверхности затвердевания, индекс «s» относится к твердой фазе, индекс «l» - к не затвердевшей фазе.

Изложены различные подходы к решению этой задачи, проведён обзор литературных источников, приведены интегральные временные зависимости глубины промерзания объектов. Реальные объекты охлаждения обычно представляют собой тела неправильной геометрической формы и при моделировании их обычно заменяют правильными геометрическими телами,

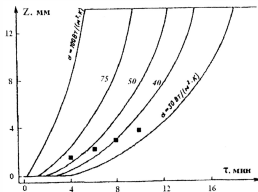
чтобы свести трехмерную геометрию к двумерной или даже одномерной. Погрешности результатов расчёта, особенно для тел биологического происхождения, определяются, прежде всего, существенной температурной зависимостью теплофизических свойств охлаждаемых тел, особенно вблизи точки затвердевания.

В разделе 4.2 представлено расчётное и экспериментальное исследование замораживания неоднородного пищевого продукта – пельмени в скороморозильном аппарате. Пельмень представляет собой мясной фарш, покрытый тестовой оболочкой. Он поступает на конвейер холодильной камеры скороморозильного аппарата (рис. 7), при начальной температуре и должен покинуть конвейер, когда его наружная поверхность затвердеет на глубину не менее 2-3 мм. Проведенные расчеты с использованием системы уравнений Стефана исследования показали достаточно хорошее качественное совпадение с экспериментальными данными на больших и средних временах процесса, а для малых времён количественное совпадение получено только для завышенных значений коэффициентов теплоотдачи (рис. 8).



1 - лента транспортера; 2 – тестовая оболочка; 3 – фаршесая начинка

Рис. 7. Движение пельменей по транспортеру в холодильной камере



■ – экспериментальные данные

Рис. 8. Зависимость глубины промерзания по Z от времени τ при различных значениях коэффициента теплоотдачи для расчетной модели

В разделе 4.3 рассмотрено моделирование процессов массообмена при испарении влаги во время охлаждения, поскольку значительное число пищевых и биологических продуктов более чем на 40%, состоят из воды. Данный процесс наиболее интенсивен в самом начале охлаждения и приводит к существенному увеличению суммарного отвода теплоты от охлаждаемого объекта:

$$q = rc|_f \rho \rho_w k (y_e - y) / \rho_w',$$

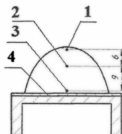
где r - теплота испарения влаги; ρ_w , ρ , ρ_w' - плотность водяных паров, охлаждаемого тела и влаги в охлаждаемом теле; k - коэффициент массопередачи; y_e и y - равновесная и текущая объемная доля водяных паров в охлаждающей среде. Массовая доля содержания влаги на поверхности тела $c|_f$ определяется из решения уравнения диффузии влаги внутри тела:

$$\frac{\partial c}{\partial \tau} = \nabla(D \nabla c),$$

где D - коэффициент диффузии.

С течением времени интенсивность испарения влаги резко сокращается из-за обеднения влагой поверхностных слоев и низкой диффузии влаги из толщи охлаждаемого тела к его поверхности.

В разделе 4.4 излагается экспериментальное исследование охлаждения и замораживания, которые проводились для стандартных пельменей на стенде, имитирующем скороморозильный аппарат, установленном в морозильной камере холодильника «Стинол». Температура пельменя измеряется термопарами, расположенными в разных местах пельменя (рис.9). Измерения показали уменьшение массы образцов после замораживания. Температура в точке 2 (рис.10) вблизи поверхности пельменя в начале процесса охлаждения уменьшается вследствие испарения влаги с поверхности, а затем возрастает, что соответствует окончанию процесса интенсивного испарения и началу нагрева поверхностного участка за счет подвода теплоты из толщи пельменя. Температура в точке 4 резко не меняет своего значения, т.к. находится вблизи поверхности соприкасающейся с бумажной лентой, которая препятствует испарению влаги.



1, 2, 3 – термопары, 4 – бумажная прокладка

Рис. 9. Расположение термопар на пельмене

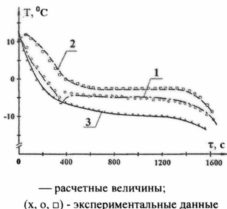


Рис. 10. Временная зависимость температуры пельменя в точках расположения термопар

В пятой главе рассмотрены процессы тепломассообмена при движении газовых пузырей в жидкости. При этом газовый пузырь может, как уменьшать свой объем за счет растворения в жидкости, так и увеличиваться, насыщаясь парами жидкости и газами, растворенными в жидкости. На базе созданных моделей тепло- и массообмена при взаимодействии газовых пузырей и жидкости проведён расчёт и анализ механизмов передачи теплоты и массовых потоков в барботажных устройствах, предназначенных для создания парогазовых смесей требуемого состава, насыщение жидкости растворёнными газами, очистки криогенной жидкости от растворённых в ней газов.

В разделе 5.1 представлены особенности тепло- и массообменных процессов при барботаже, сделан обзор литературы и анализ имеющихся расчётных моделей взаимодействия газовых пузырей и жидкости.

В разделе 5.2 изложено моделирование изотермического массообмена при движении единичного газового пузыря, состоящего из чистого газа или смеси газов, через слой чистой жидкости, так и содержащей растворённые в ней газы. Изменение объёма газового пузыря во времени за счёт диффузии газов из пузыря в жидкость, обратной диффузии растворённых газов из жидкости в пузырь и испарения паров жидкости в пузырь определится

$$\frac{dV}{d\tau} = 4\pi\alpha_{\phi}r_n^2 \left(\sum_{i=1}^n k_i \cdot (C_i - C_{i_{\max}}) \frac{\rho_{\infty} m_i}{\rho_i m_{\infty}} + k_{\infty} \cdot (y_e - y_{\infty}) \right),$$

где V – объём газового пузыря, τ - время, α_{ϕ} - коэффициент формы пузыря, r_n - эффективный радиус пузыря, учитывающий отклонение реальной поверхности пузыря от сферы,

k_i - объёмный коэффициент удельной массопередачи для i -ого газового компонента,

C_i - мольная доля i -ого газового компонента в жидкости,

$C_{i_{\max}}$ - предельная мольная доля растворённого i -ого газового компонента в жидкости,

ρ_{∞} - плотность жидкости,

ρ_i - плотность i -ого газового компонента при температуре T и давлении p процесса массопередачи,

m_{∞} - мольная масса жидкости;

m_i - мольная масса i -ого газового компонента,

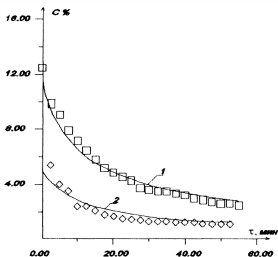
y_{∞} - мольная доля паров жидкости в пузыре;

y_e - предельная мольная доля паров жидкости в пузыре.

Обратная диффузия паров жидкости в пузырь оказывает влияние только в самом начале процесса, приводя к слабому увеличению радиуса. При уменьшении в жидкости растворенных газов массопередача газа из пузырька в жидкость увеличивается.

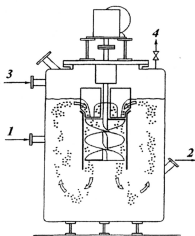
В разделе 5.3 представлено моделирование работы барботажной колонны без перемешивания, снизу которой подаются потоки жидкости и газа, а сверху отводятся получившиеся в результате массообмена потоки газа и жидкости. В данном случае концентрация растворенных компонентов в жидкости изменяется по высоте колонны. Расчётная модель была использована при проектировании барботажной колонны, предназначенной для получения газовой смеси воздуха и бензина (рис. 11) в экспериментальной установке улавливания паров бензина.

В разделе 5.4 изложено моделирование барботажной колонны с перемешиванием жидкости и газовых пузырей. Данная расчётная модель была использована для анализа работы химического реактора AGR фирмы PRAXAIR (США), предназначенного для растворения газа в жидкости (рис.12). Расчётные и экспериментальные данные приведены на рис. 13.



Δ , $\circ$ -- экспериментальные данные 1, 2 - расчётные значения

Рис. 11. Временная зависимость концентрации воздухобензиновой смеси на выходе из барботажного устройства



1 – вход чистой жидкости, 2 – выход жидкости, насыщенной кислородом, 3 – вход кислорода, 4 – выход избыточного газа, 5 – приводное устройство шнекового перемешивателя

Рис. 12. Схема газового реактора фирмы PRAXAIR

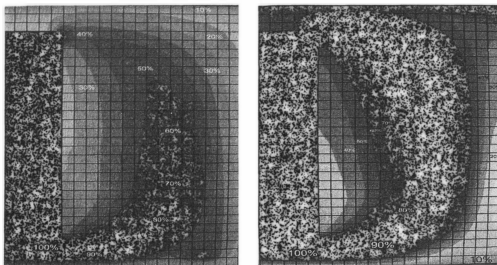


Рис. 13. Расчётные результаты и экспериментальные (%) данные, полученные при работе газового реактора фирмы PRAXAIR

В разделе 5.5 представлен неизотермический массообмен для случая, когда подаваемые в колонну пузыри имеют температуру более высокую, чем жидкость в колонне. Данный процесс моделируется сопряженной задачей тепломассообмена при всплытии пузырей. При решении данной задачи необходимо проанализировать и оценить характерные времена трех основных процессов: теплообмена при охлаждении пузырей, диффузии растворённого газа в пузырь и всплытия пузыря. Проведённые расчёты для таких газов в пузыре как азот, кислород, аргон, неон, гелия и аналогичных жидкостей, показали, что характерное время теплообмена на 3-4 порядка меньше времени полной диффузии и времени всплытия пузыря. Это позволяет первоначально рассчитывать процесс охлаждения независимо от диффузии. Также проведён расчет процессов в барботажной колонне при очистке жидкости от растворенных в ней газов, которые показали, что необходимое количество подаваемого газа в колонну определяется только радиусом пузыря и высотой столба жидкости в колонне. При малых радиусах пузыря зависимость от высоты столба жидкости практически отсутствует, это связано с тем, что время полной диффузии

растворенного газа из жидкости в пузырь до предельного значения меньше времени всплытия пузыря. Для больших радиусов пузыря время диффузии становится больше времени всплытия и поэтому пузыри покидают жидкость не полностью насыщенные растворенным в жидкости газом. При этом большей высоте столба жидкости соответствует меньшее количество подаваемого газа в пузырях, т.к. время движения пузыря увеличивается и процесс диффузии продолжается дольше.

В каждой главе диссертации сделаны конкретные выводы по существу рассмотренных проблем.

Основные результаты и выводы

- Проанализированы известные и созданы новые методы расчета работы теплообменных аппаратов и установок техники низких температур в меняющихся и нестационарных режимах;
- Предложена и реализована многоуровневая расчетная система для определения рациональных параметров меняющихся режимов работы низкотемпературных установок;
- Впервые получена интегральная оценка времени охлаждения объектов для различных условий охлаждения и сделан анализ механизмов переноса теплоты для этих случаев, позволяющая определить роль основных механизмов передачи теплоты для разных условий охлаждения;
- Впервые разработана модель процесса охлаждения объектов с осевыми каналами для течения хладоносителя, позволяющая определить рациональную организацию этого процесса применительно к установке утилизации резины из изношенных автопокрышек по кривозрывной технологии;
- Впервые проведён анализ влияния испарения влаги на процесс охлаждения и замораживания тел. Создана модель процесса сопряжённого тепломассообмена при замораживании пищевых продуктов в скороморозильных аппаратах;
- Впервые детально рассмотрены механизмы передачи массы и теплоты при неизотермическом барботажном процессе. Выполнено моделирование работы установок для получения газопаровых смесей заданного состава,

очистки жидкости от растворённого в ней газа или насыщения жидкости растворёнными газами.

Основные положения диссертации опубликованы в работах

1. Козлов В.Н., Лавров Н.А. Моделирование динамического режима работы теплообменного аппарата // Известия ВУЗ. Машиностроение. - 1988.-№ 8.- С.56-60.
2. Теоретическое и экспериментальное исследование работы криогенного оживителя / В.Н.Козлов [и др.] // Известия ВУЗ. Машиностроение.- 1989.- № 4.- С.50-54.
3. Козлов В.Н., Лавров Н.А. Методы расчета динамических характеристик криогенных систем // Труды МВТУ. - 1989.- № 533.- С.4-24.
4. Козлов В.Н., Лавров Н.А., Дитятев В.Н. Теоретическое и экспериментальное исследование пускового периода криогенного оживителя // Известия ВУЗ. Машиностроение.- 1990. - № 4.- С.49-51.
5. Козлов В.Н., Лавров Н.А. Использование ограниченных экспериментальных данных для расчета теплообменников // Известия ВУЗ. Машиностроение.- 1990.-№ 9.- С.48-50.
6. Козлов В.Н., Лавров Н.А., Дитятев В.Н. Математическая модель управления криогенными установками // Труды МВТУ. - 1991.- № 534.- С.177-194.
7. Козлов В.Н., Лавров Н.А. Моделирование динамического режима работы теплообменного аппарата // Криогенная техника - науке и производству: Тезисы Международной научно- практической конференции. - Москва, 1991. – С.139.
8. Козлов В.Н., Лавров Н.А. Многоуровневая расчетная система оптимизации режимов работы криогенных установок // Криогенная техника - науке и производству: Тезисы Международной научно- практической конференции. - Москва, 1991. – С.143.
9. Козлов В.Н., Лавров Н.А. Расчетная система управления криогенными установками // Известия ВУЗ. Машиностроение.- 1991.-№ 4-6.- С.70-73.
10. Козлов В.Н., Лавров Н.А. Система оптимизации с сосредоточенными параметрами для исследования работы криогенного оживителя // Известия ВУЗ. Машиностроение.- 1992.-№ 10-12.- С.71-75.

11. Шишов В.В., Лавров Н.А. Математическая модель процесса замораживания пищевых продуктов // Вестник МГТУ. Машиностроение.- 1993.-№3.- С.124-130.
12. Lavrov N.A., Shishov V.V. Freezing processes with phase transition modelling // International symposium heat transfer enhancement in power machinery (НТЕРМ'95): Abstract of papers.- Moscow, 1995. - Part II. - P.202-204.
13. Lavrov N.A., Shishov V.V. Heat and mass exchange during food freezing // 19th International congress of refrigeration: Book of abstracts. – Hauge (Netherlands), 1995. – P.210.
14. Лавров Н.А. Метод численного решения систем уравнений, описывающих стационарные режимы работы двухпоточного теплообменника // Вестник МГТУ. Машиностроение. - 1996. - Спец. выпуск Криогенная и холодильная техника. Криомедицина. – С.13-18.
15. Лавров Н.А., Карлов С.А. Аналитическое решения систем уравнений, описывающих стационарные режимы работы трехпоточного противоточного теплообменника // Вестник МГТУ. Машиностроение. - 1996. - Спец. выпуск Криогенная и холодильная техника. Криомедицина. – С.18-22.
16. Моделирование процессов массообмена при движении газовых пузырей через слой жидкости / А.М.Архаров [и др.] // Вестник МГТУ. Машиностроение. - 1996. - Спец. выпуск Криогенная и холодильная техника. Криомедицина. – С.84-91.
17. Лавров Н.А., Хруничева Е.В. Приближенная оценка времени захлаживания тела // Вестник МГТУ. Машиностроение. - 1998. - Спец. выпуск Криогенная и холодильная техника. – С.70-81.
18. Лавров Н.А. Моделирование процессов замораживания с сопряженным тепло- и массообменом // Вестник международной академии холода. - 2000. - №4. – С.10-12.
19. Лавров Н.А., Кучер М.А. Оценка увеличения холодопроизводительности в рефрижераторах с избыточным обратным потоком при уменьшении потерь смешения // Вестник МГТУ. Машиностроение. - 2000. - Спец. выпуск Криогенная и холодильная техника. – С.77-86.
20. Лавров Н.А., Маринин Ю.В. Поверочный расчет холодильной машины // Вестник МГТУ. Машиностроение. - 2002. - Спец. выпуск Криогенная и холодильная техника. – С.135-143.

21. Лавров Н.А., Шадрина В.Ю., Набок А.А. Процессы охлаждения изношенных автопокрышек для криовзрывной утилизации // Образование через науку: Тезисы Международного симпозиума. – Москва, 2005. – С.484.
22. Лавров Н.А., Шадрина В.Ю. Использование реверсирования охлаждающего потока для сокращения времени охлаждения изношенных автопокрышек // Вестник МГТУ. Машиностроение. - 2005. - Спец. выпуск Криогенная и холодильная техника. Криомедицина.– С.77-83.
23. Лавров Н.А., Шадрина В.Ю. Математическое моделирование процессов захлаживания тел с осевыми каналами // Вестник МГТУ. Машиностроение. - 2008. - Спец. выпуск Криогенная и холодильная техника, системы кондиционирования и жизнеобеспечения. – С.156-159.
24. Лавров Н.А., Скорнякова Е.А. Моделирование процессов очистки жидкости от растворённого в ней газа при барботаже // Холодильная и криогенная техника, промышленные газы, системы кондиционирования и жизнеобеспечения: Тезисы Международной научной конференции. – Москва, 2010. – С.24 - 26.
25. Лавров Н.А., Скорнякова Е.А. Метод оценки временных характеристик процессов очистки сжиженного газа от растворённого в нём газа при барботировании // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2010. - №2 – С.16-18.
26. Лавров Н.А., Скорнякова Е.А. Моделирование процессов очистки жидкости от растворённого в ней газа при барботаже // Вестник МГТУ. Машиностроение. - 2010. - Спец. выпуск Холодильная и криогенная техника, системы кондиционирования и жизнеобеспечения. – С.155-160.
27. Лавров Н.А. Моделирование процесса получения парогазовой смеси в барботажном устройстве // Криогенные технологии и оборудование. Перспективы развития: Тезисы Девятой международной научно-практической конференции. – Москва, 2012. – С. 41-45.
28. Лавров Н.А. Моделирование процесса насыщения газовых пузырей парами жидкости в барботажной колонне // Вестник МГТУ. Машиностроение. - 2013. - Спец. выпуск №1 Холодильная и криогенная техника, системы кондиционирования и жизнеобеспечения.– С.5-8.