

На правах рукописи

УДК 651. 574. 041

Кротов Александр Сергеевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ПАРОКОМПРЕССИОННЫХ ХОЛОДИЛЬНЫХ МАШИН
НА МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СМЕСЯХ ХЛАДАГЕНТОВ**

Специальность 05.04.03. Машины, аппараты и процессы холодильной и криогенной техники, систем кондиционирования и жизнеобеспечения

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2011

Работа выполнена в Московском государственном техническом
университете им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Жердев Анатолий Анатольевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Калнинь Игорь Мартынович

кандидат технических наук, доцент
Лунин Анатолий Иванович

Ведущее предприятие: ГНУ ВНИХИ Россельхозакадемии

Защита состоится «22» июня 2011 г. в 16 час. 00 мин. на заседании
диссертационного совета Д 212.141.16 в МГТУ им. Н.Э. Баумана по
адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5

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

Ваши отзывы в 2-х экземплярах, заверенные печатью, просьба высылать
по указанному адресу.

Автореферат разослан “ _____ ” _____ 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного Совета Д212.141.16
кандидат технических наук

Колосов М.А.

Общая характеристика работы

Актуальность темы: низкотемпературные камеры и рефрижераторы различных конструкций с полезным объёмом 100-600 л и температурой охлаждения минус 40 ... минус 150°С широко используются во многих областях науки и техники, например:

- замораживание и хранение биологических материалов;
- термообработка металлов;
- температурные испытания;
- эксперименты в области электроники и сверхпроводимости.

Технико-экономический анализ имеющейся информации показывает, что в России в ближайшее время будут востребованы низкотемпературные камеры с парокомпрессионными холодильными машинами (ПКХМ) на многокомпонентных смесях хладагентов. Подобное оборудование в России серийно не выпускается. Существующие опытные образцы низкотемпературных камер с ПКХМ на смесях со стандартным герметичным компрессором, созданные при непосредственном участии автора, могут применяться только для ограниченного круга задач, поскольку не обеспечивают необходимых режимов охлаждения. В связи с этим актуальным является проведение исследования динамических характеристик парокомпрессионных холодильных машин низкотемпературных камер. На основе имеющихся разработок и с использованием результатов будущих исследований может быть создана целая гамма холодильного оборудования многоцелевого назначения, способного заменить как азотные системы заморозки и хранения, так и импортные парокомпрессионные рефрижераторы.

Цель работы: разработка методов определения динамических характеристик парокомпрессионных холодильных машин на многокомпонентных смесях хладагентов и получение с их помощью данных, необходимых для создания на базе ПКХМ низкотемпературного оборудования, обеспечивающего требуемые режимы охлаждения.

Основные задачи работы:

1. Создание метода определения зависимости изменения холодопроизводительности ПКХМ на многокомпонентных смесях хладагентов в процессе охлаждения низкотемпературной камеры от состава рабочего тела и общего количества его заправки, который должен включать в себя:

- методику теоретического определения холодопроизводительности в нестационарных режимах работы ПКХМ на многокомпонентных смесях хладагентов;
- методику экспериментального определения холодопроизводительности парокомпрессионной холодильной машины низкотемпературной камеры, основанную на расчёте нестационарных процессов переноса тепла в теплоизолированном корпусе камеры.

2. Разработка и изготовление экспериментального стенда для исследования динамических характеристик ПКХМ на смесях хладагентов на базе низкотемпературной камеры

3. Проведение исследований с помощью разработанного метода и получение данных, необходимых для проектирования будущих установок.

Научная новизна:

1. Разработан метод определения зависимости изменения холодопроизводительности ПКХМ на многокомпонентных смесях хладагентов в процессе охлаждения низкотемпературной камеры от состава рабочего тела и общего количества его заправки, включающий в себя:

- методику теоретического определения холодопроизводительности в нестационарных режимах работы ПКХМ на смесях хладагентов, основанную на расчёте свойств смесей хладагентов и математическом моделировании цикла холодильной машины;
- методику экспериментального определения холодопроизводительности пароконденсационной холодильной машины низкотемпературной камеры по изменению температуры воздуха в рабочем объёме камеры.

2. Установлена зависимость холодопроизводительности ПКХМ на многокомпонентных смесях хладагентов в процессе охлаждения низкотемпературной камеры только от текущей температуры воздуха в её рабочем объёме (холодопроизводительность не зависит от нагрузки на ПКХМ).

3. Показано, что концентрация каждого компонента в рабочей смеси ПКХМ влияет на холодопроизводительность ПКХМ в определённом диапазоне температур воздуха в рабочем объёме низкотемпературной камеры, определены данные диапазоны для компонентов тройной смеси R142b/R22/R14.

Практическая значимость и реализация результатов работы:

1. Определены принципы, позволяющие подбирать состав рабочей смеси ПКХМ для обеспечения требуемой скорости охлаждения в заданном диапазоне температур.

2. Предложена схема организации цикла работы холодильной машины, защищённая заявкой на получение патента (№2010141804), которая позволила увеличить скорость охлаждения низкотемпературной камеры по сравнению с традиционно применяемыми в настоящее время циклами.

3. Разработана программа для ЭВМ, позволяющая рассчитывать изменение холодопроизводительности ПКХМ на смесях хладагентов в нестационарных процессах работы, основанная на математическом моделировании цикла холодильной машины.

4. Разработана программа для ЭВМ, позволяющая рассчитывать значение холодопроизводительности ПКХМ в процессе охлаждения низкотемпературной камеры, по данным об изменении температуры воздуха в её рабочем объёме, а также рассчитывать зависимость температуры воздуха в рабочем объёме камеры от времени работы ПКХМ по данным об изменении холодопроизводительности в процессе охлаждения.

Рекомендации к внедрению:

Результаты работы внедрены в процесс разработки низкотемпературных камер в ОАО «ЦНИИ «Курс» и процесс их производства в ОАО «Электромеханика».

Опытный образец низкотемпературной камеры, созданной с применением результатов проведённых исследований, предназначенный для охлаждения с максимальной скоростью деталей авиационных двигателей, внедрён в технологический процесс производства на ФГУП ММПП «Салют».

Предложенная схема организации цикла работы холодильной машины и методика расчёта его характеристик введены в курс «Теоретические основы холодильной техники», преподаваемый на кафедре Э-4 МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Достоверность полученных данных обеспечивалась применением аттестованных измерительных средств и апробированных методик измерения, хорошей повторяемостью полученных результатов измерений. Основные уравнения представленных математических моделей базируются на фундаментальных законах и уравнениях термодинамики, современных численных и аналитических методах реализации математических моделей.

На защиту выносятся:

1. Предложенный метод определения динамических характеристик ПКХМ на многокомпонентных смесях хладагентов, включающий:

- методику теоретического определения холодопроизводительности в нестационарных режимах работы ПКХМ на смесях хладагентов, основанную на расчёте свойств смесей хладагентов и математическом моделировании цикла холодильной машины;
- методику экспериментального определения холодопроизводительности парокомпрессионной холодильной машины низкотемпературной камеры, основанную на расчёте нестационарных процессов переноса тепла в теплоизолированном корпусе камеры.

2. Результаты теоретических и экспериментальных исследований, позволившие получить данные о влиянии концентраций компонентов тройной смеси R142b, R22, R14 и общего количества заправки рабочего тела на скорость охлаждения низкотемпературной камеры с ПКХМ на многокомпонентных смесях хладагентов в диапазоне температур воздуха в рабочем объёме камеры до минус 90°C.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на:

IV международной научно-технической конференции «Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке», Санкт-Петербург, 2009;

Международной конференции с элементами научной школы для молодёжи «Инновационные разработки в области техники и физики низких температур», Москва, 2010;

Международной конференции «Состояние и перспективы развития индустрии холода, климатической техники и тепловых насосов», Выставка «Chillventa Rossija», Москва, 2011.

Личный вклад автора заключается в разработке метода определения динамических характеристик пароконденсационных холодильных машин на многокомпонентных смесях хладагентов, разработке экспериментального стенда и проведении исследований по данному методу.

Публикации. Результаты диссертации отражены в 3 научных статьях, 2 из которых в журналах, рекомендуемых ВАК, опубликованы тезисы 2 докладов.

Структура и объем диссертации:

Диссертация состоит из введения, трёх глав, выводов, списка литературы, приложения и содержит 178 стр. основного текста, 42 рис., 7 таблиц.

Содержание работы

В первой главе анализируются необходимость исследования динамических характеристик ПКХМ на смесях хладагентов. Рассматриваются области применения низкотемпературных рефрижераторов с температурой охлаждения минус 40 ... минус 150 °С. Делается вывод, что во всех областях, где используются низкотемпературные камеры и рефрижераторы, часто требуется обеспечение высокой скорости охлаждения объектов, либо обеспечение строго определённой, контролируемой скорости охлаждения.

Актуальным направлением является разработка низкотемпературных камер с ПКХМ на многокомпонентных смесях хладагентов, позволяющих осуществлять не только хранение, но и охлаждение с необходимой скоростью. Для решения данной задачи необходимо исследование динамических характеристик ПКХМ на смесях хладагентов. Под динамическими характеристиками в данном случае понимается изменение холодопроизводительности ПКХМ во время охлаждения низкотемпературной камеры. Данные исследования позволят обеспечить соблюдение требуемого режима понижения температуры при охлаждении объектов.

На основании проведённых исследований и учитывая недостатки существующих систем, была разработана холодильная машина, предназначенная для работы на многокомпонентной смеси хладагентов, принципиальная гидравлическая схема которой представлена на рисунке 1. Данная схема работы холодильной машины защищена заявкой (№2010141804) на получение патента на изобретение. Особенности данной холодильной машины являются наличие отделителя жидкости и перепускной линии.

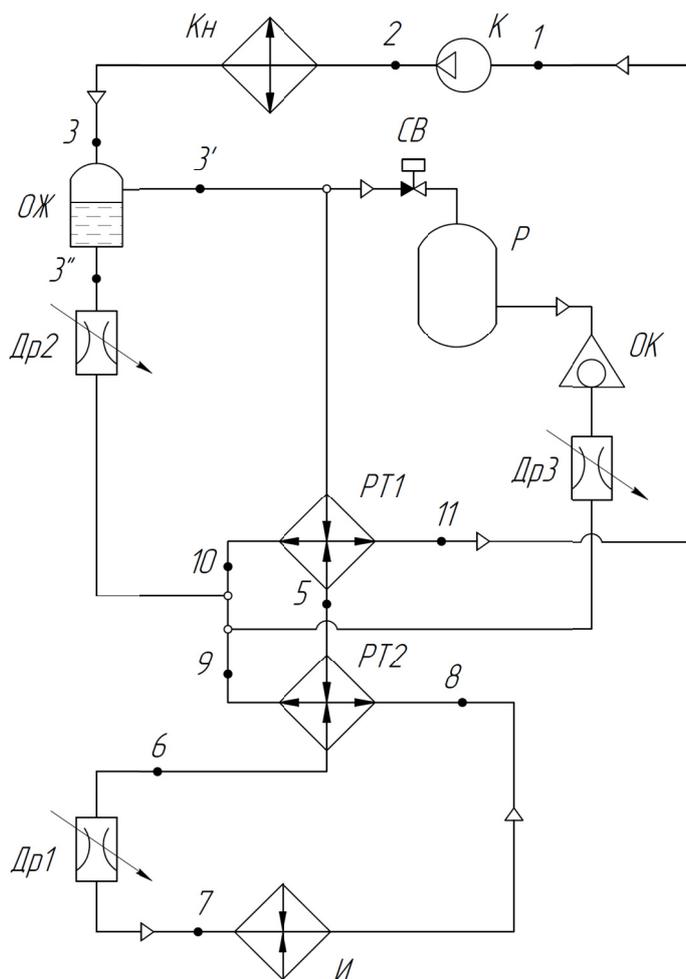


Рис. 1. Принципиальная гидравлическая схема холодильной машины

- К – компрессор;
- Кн – конденсатор;
- ОЖ – отделитель жидкости;
- Др1 – основное дросселирующее устройство;
- Др2 – предварительное дросселирующее устройство;
- РТ1 – предварительный рекуперативный теплообменник;
- РТ2 – основной рекуперативный теплообменник;
- И – испаритель,
- СВ – соленоидный вентиль;
- Р – ресивер;
- ОК – обратный клапан;
- Др3 – дросселирующее устройство

Большая часть смазочного масла компрессора остаётся в жидкой фазе в отделителе жидкости, и возвращается в компрессор, не проходя через основное дросселирующее устройство и испаритель, где возможно замерзание масла при низких температурах охлаждения. Это повышает надёжность всей холодильной машины.

Перепускная линия устроена так, что при превышении давлением нагнетания определённого значения открывается соленоидный вентиль, и часть смесового хладагента, обогащённая низкокипящими компонентами, перепускается в ресивер. Благодаря этому удаётся сократить время выхода на режим. Также ограничение давление нагнетания в пусковой период позволяет использовать рабочую смесь с большим содержанием низкокипящих компонентов, и, следовательно, получить большую холодопроизводительность на низком температурном уровне.

Главное преимущество вышеуказанной схемы состоит в ограничении давления нагнетания в пусковой период, что позволяет применять одноступенчатый поршневой герметичный компрессор. Это позволит свести утечки хладагента к минимуму, и, соответственно, значительно снизить частоту необходимого техобслуживания или вовсе от него отказаться. Подобные компрессоры в широком ассортименте выпускаются серийно, и стоят значительно меньше двухступенчатых.

Анализ областей использования низкотемпературных камер для охлаждения объектов показал, что наиболее актуально проведение

исследований динамических характеристик ПКХМ на смесях в области температур до ~ минус 90 °С.

Проведён обзор способов определения холодопроизводительности ПКХМ. Определены направления разработки методик теоретического и экспериментального определения холодопроизводительности ПКХМ на многокомпонентных смесях хладагентов в процессе охлаждения низкотемпературной камеры.

В конце главы, на основании собранной информации, формулируется цель работы и задачи, подлежащие решению для её достижения.

Во второй главе приводится обоснование выбора качественного состава рабочего тела, который целесообразно использовать для проведения исследований динамических характеристик ПКХМ.

Более изученными являются фреоны, именно для них существует множество экспериментальных данных по фазовому равновесию и известны эмпирические коэффициенты уравнений состояния. Смесь фреонов R142b, R22, R14 ранее применялась в нескольких работах для получения исследуемого в настоящей работе диапазона температур охлаждения, и поэтому данная смесь выбрана в качестве модельной для проведения исследований динамических характеристик ПКХМ.

Данная смесь при низких температурах является «расслаивающейся», т.е. в зависимости от концентрации компонентов может образовываться три совместно существующие фазы: две несмешивающиеся жидкости и пар. При этом одна жидкость имеет повышенное содержание низкокипящих компонентов (практически полностью состоит из R14), а вторая – высококипящих.

Фреоны R142b и R22 разрешены к применению в России до 2030 года. В качестве альтернативы фреону R142b может служить нормальный бутан (C₄H₁₀), а фреону R22 – пропан (C₃H₈) либо фреон R218.

Методика теоретического определения холодопроизводительности ПКХМ основана на расчёте цикла ПКХМ на различных температурных уровнях в процессе охлаждения.

Из литературы известна методика расчёта свойств многокомпонентных смесей на основе уравнения Редлиха-Квонга-Соаве. Суть данной методики состоит в совместном решении термического уравнения состояния, записанного для паровой и жидкой фаз смеси, и условий фазового равновесия для каждого компонента смеси. Условием фазового равновесия при этом является равенство логарифмов летучестей компонентов в паровой и жидкой фазах. Данная методика была апробирована на примере расчета термодинамических свойств бинарной смеси хладагентов R22, R14, показала удовлетворительное совпадение с экспериментальными данными и использована в настоящей работе для расчета термодинамических свойств смеси хладагентов R142b, R22, R14.

Последовательность расчёта характеристик цикла ПКХМ на смесях хладагентов в общем случае заключающаяся в следующем:

1. По выбранной методике рассчитываются свойства смеси заданного состава (энтальпия, энтропия, удельный объём) для изобар прямого и обратного потоков в зависимости от температуры. При этом зависимости аппроксимируются кусочно-линейными функциями с заданным шагом по температуре.

2. На основе рассчитанных зависимостей из уравнений теплового баланса определяются тепловые нагрузки на теплообменные аппараты, испаритель и конденсатор, а также работа сжатия компрессора. При этом также могут учитываться коэффициенты, определяющие эффективность их работы.

Для экспериментальных исследований была разработана методика косвенного определения холодопроизводительности ПКХМ по изменению температуры воздуха в рабочем объёме низкотемпературной камеры.

В низкотемпературных камерах ПКХМ как генератор холода постоянно работает в нестационарных условиях, прежде всего при переменной во времени температуре реализации генерируемого холода. С другой стороны, тепловая нагрузка на ПКХМ определяется как результат нестационарных процессов передачи тепла в общем случае в объектах охлаждения, элементах конструкции теплоизолированного корпуса низкотемпературной камеры и на ее внешней поверхности.

Точное определение тепловой нагрузки на ПКХМ требует разработки сложных физических и математических моделей нестационарных процессов передачи тепла, учитывающих особенности конструкции конкретной низкотемпературной камеры и представляется нецелесообразным. В данной работе в качестве альтернативы разработана упрощенная модель теплового состояния низкотемпературной камеры, учитывающая влияние основных тепловых потоков на тепловую нагрузку на ПКХМ в нестационарных условиях ее эксплуатации.

В общем случае теплоизолированный корпус низкотемпературной камеры представляет собой трёхслойную конструкцию, состоящую из внешней и внутренней металлических стенок и заключённой между ними тепловой изоляции. Передача тепла в каждом из слоев осуществляется теплопроводностью, а на внешней и внутренней поверхностях – за счёт конвективного теплообмена. В процессе выхода на установившийся режим эксплуатации производительность холодильной машины затрачивается на компенсацию теплопритоков из окружающей среды и охлаждение теплоемкой массы корпуса. Расчётная схема теплоизолированного корпуса низкотемпературной камеры представлена на рисунке 2.

В соответствии с данной схемой, для определения изменения холодопроизводительности по данным об изменении температуры в рабочем объёме камеры требуется расчёт нестационарного трёхмерного температурного поля. Однако, проведённые расчёты и сравнительный анализ результатов получаемых с помощью одномерной и двумерной математических моделей показали, что двумерная модель обеспечивает результаты с достаточной для

практических расчётов точно, а разработка намного более сложной трёхмерной модели нецелесообразна.

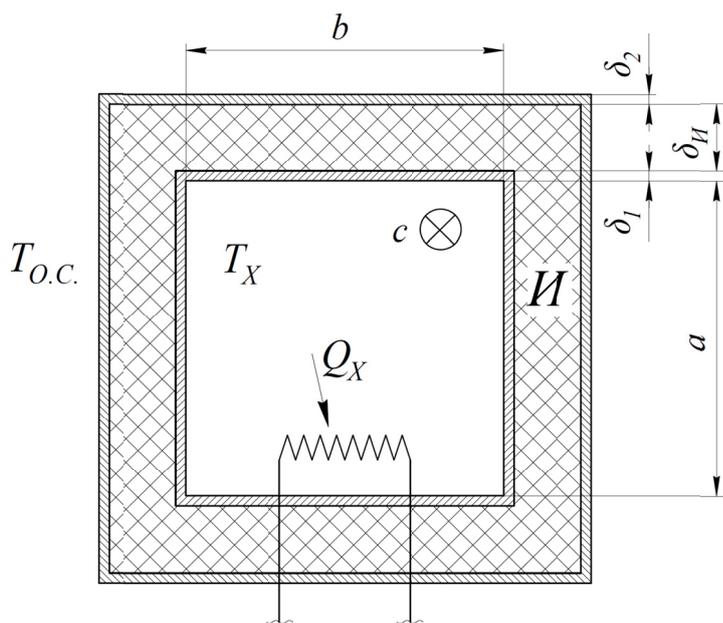


Рис. 2. Расчётная схема камеры

И – тепловая изоляция;
 T_X – температура воздуха в рабочем объёме камеры;
 Q_X – холодопроизводительность ПКХМ;
 $T_{O.C.}$ – температура окружающей среды;
 δ_1, δ_2 – толщины стенок;
 δ_{II} – толщина тепловой изоляции;
 a, b, c – размеры рабочего объёма камеры

Расчетная схема двумерной математической модели нестационарного переноса тепла по толщине теплоизолированного корпуса низкотемпературной камеры представлена на рисунке 3.

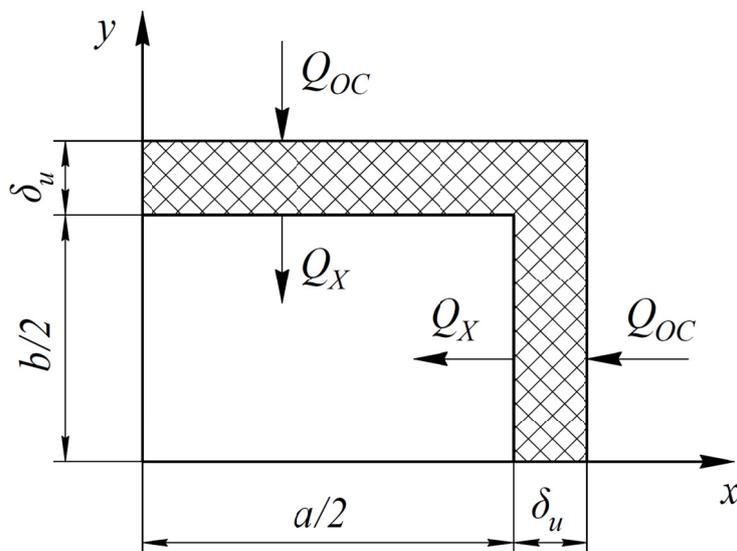


Рис. 3. Расчётная схема двумерной модели

Расчетная схема представляет четвертую часть упрощенного разреза теплоизолированного корпуса камеры по одной из плоскостей симметрии. Поскольку толщины стенок существенно меньше толщины тепловой изоляции, а коэффициент теплопроводности металлических корпусов существенно больше коэффициента теплопроводности материала теплоизоляции, с достаточной степенью точности можно считать, что температура стенок не зависит от пространственной координаты. С математической точки зрения это означает, что полосы шириной δ_1, δ_2 стягиваются в линию, а уравнения теплопроводности для этих участков заменяются уравнениями теплового баланса.

Таким образом, при принятом допущении в рамках двумерной модели температурное поле по толщине тепловой изоляции теплоизолированного корпуса камеры описывается уравнением теплопроводности:

$$\rho_{II} C_{PII} \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} (\lambda_{II} \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\lambda_{II} \frac{\partial T}{\partial y}),$$

$$(0 \leq x < \frac{a}{2} + \delta_{II}; \frac{b}{2} < y < \frac{b}{2} + \delta_{II}) \cup (\frac{a}{2} < x < \frac{a}{2} + \delta_{II}; 0 \leq y \leq \frac{b}{2}) \quad (1)$$

где ρ_{II} , C_{PII} , λ_{II} – плотность, удельная теплоемкость, коэффициент теплопроводности материала теплоизоляции корпуса соответственно;

T – температура;

x – пространственная координата;

τ – временная координата.

Уравнение теплопроводности для внутренней стенки заменяется следующими уравнениями теплового баланса:

$$\delta_1 \rho_1 C_{p1} \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda_{II} \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{y=\frac{b}{2}} - \alpha_{внутр} (T \Big|_{y=\frac{b}{2}} - T_x) + \lambda_1 \delta_1 \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}, \quad (x = \frac{a}{2}; 0 \leq y < \frac{b}{2}) \quad (2)$$

$$\delta_1 \rho_1 C_{p1} \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda_1 \delta_1 \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \alpha_{внутр} (T \Big|_{x=\frac{a}{2}} - T_x) + \lambda_{II} \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{x=\frac{a}{2}}, \quad (0 \leq x < \frac{a}{2}; y = \frac{b}{2}) \quad (3)$$

$$\delta_1 \rho_1 C_{p1} \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda_{II} \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{y=\frac{b}{2}} - \lambda_1 \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{y=\frac{b}{2}} + \lambda_{II} \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{x=\frac{a}{2}} - \lambda_1 \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{x=\frac{a}{2}}, \quad (x = \frac{a}{2}; y = \frac{b}{2}) \quad (4)$$

где δ_1 , ρ_1 , C_{p1} – толщина, плотность, удельная теплоемкость внутренней стенки соответственно;

λ_1 – коэффициент теплопроводности материала внутренней стенки;

$\alpha_{внутр}$ – коэффициент теплоотдачи от внутренней стенки к воздуху внутри рабочего объема камеры.

Уравнение теплопроводности для внешней стенки заменяется следующим уравнением теплового баланса:

$$\delta_2 \rho_2 C_{p2} \frac{\partial T}{\partial \tau} = \alpha_{внешн} (T_{OC} - T \Big|_{x=\frac{a}{2}+\delta_{II}}) - \lambda_{II} \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=\frac{a}{2}+\delta_{II}} + \lambda_2 \delta_2 \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}, \quad (x = \frac{a}{2} + \delta_{II}; 0 \leq y < \frac{b}{2} + \delta_{II}) \quad (5)$$

$$\delta_2 \rho_2 C_{p2} \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda_2 \delta_2 \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \alpha_{внешн} (T_{OC} - T \Big|_{y=\frac{b}{2}+\delta_{II}}) - \lambda_{II} \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=\frac{b}{2}+\delta_{II}}, \quad (0 \leq x < \frac{a}{2} + \delta_{II}; y = \frac{b}{2} + \delta_{II}) \quad (6)$$

$$\delta_2 \rho_2 C_{p2} \frac{\partial T}{\partial \tau} = \alpha_{внешн} (T_{OC} - T \Big|_{y=\frac{b}{2}+\delta_{II}}) - \lambda_2 \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{y=\frac{b}{2}+\delta_{II}} + \alpha_{внешн} (T_{OC} - T \Big|_{x=\frac{a}{2}+\delta_{II}}) - \lambda_2 \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{x=\frac{a}{2}+\delta_{II}},$$

$$(x = \frac{a}{2} + \delta_{II}; y = \frac{b}{2} + \delta_{II}) \quad (7)$$

где δ_2 , ρ_2 , C_{p2} – толщина, плотность, удельная теплоемкость внешней стенки соответственно;

λ_2 – коэффициент теплопроводности материала внешней стенки;

$\alpha_{внешн}$ – коэффициент теплоотдачи от внешней стенки к воздуху окружающей среды.

Кроме вышеперечисленных граничных условий необходимо задать граничные условия на координатных осях. В силу симметрии конструкции теплоизолированного корпуса относительно координатных осей граничные условия на координатных осях сводятся к равенству нулю теплового потока в нормальных направлениях, т.е.:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = 0, \quad (0 \leq y \leq \frac{b}{2} + \delta_{II}) ; \quad \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=0} = 0, \quad (0 \leq x \leq \frac{a}{2} + \delta_{II}) \quad (8)$$

В качестве начального условия для решения уравнения теплопроводности принимается условие равенства температуры теплоизолированного корпуса температуре окружающей среды, т.е.:

$$T(x, y) \Big|_{\tau=0} = T_{OC} \quad (9)$$

Тепловой баланс рабочего объема низкотемпературной камеры упрощенно может быть записан:

$$\alpha_{внутр} F_{внутр} (T_{ср.внутр} - T_X) - Q_X = 0 \quad (10)$$

где $T_{ср.внутр}$ – средняя температура внутренней стенки.

Полученная краевая задача (1)-(9) решалась методом конечных разностей.

Данный метод определения холодопроизводительности на различных температурных уровнях охлаждения низкотемпературной камеры был реализован в виде программы для ЭВМ «HOLOD 2X», разработанной в среде «Delphi». Также в программу «HOLOD 2X» добавлена возможность проведения обратного расчёта, т.е. определения зависимости температуры воздуха в рабочем объеме низкотемпературной камеры от времени по известной зависимости холодопроизводительности от данной температуры.

В третьей главе представлены результаты экспериментального исследования динамических характеристик ПКХМ на многокомпонентных смесях хладагентов.

Функционально экспериментальный стенд для исследования динамических характеристик ПКХМ на многокомпонентных смесях хладагентов представляет собой низкотемпературную холодильную камеру, типа «ларь». Основными составляющими экспериментального стенда являются: теплоизолированный корпус камеры, пароконденсационная холодильная машина, работающая по схеме, представленной на рисунке 1, комплекс контрольно-измерительной аппаратуры. Внешний вид экспериментального стенда представлен на рисунке 4.

В качестве исходной при проведении экспериментальных исследований была выбрана смесь хладагентов следующего мольного состава: R142b – 23,4%, R22 – 40,9%, R14 – 35,7%, количество заправки – 12,735 моль. Данный состав смеси хладагентов ранее использовался в опытном рефрижераторе ЛНМ-200/90, на базе корпуса которого создан экспериментальный стенд для обеспечения максимальной холодопроизводительности при рабочей температуре воздуха в рабочем объеме минус 90 °С.



Рис. 4. Внешний вид экспериментального стенда для исследования динамических характеристик ПКХМ на многокомпонентных смесях хладагентов

Для определения основных факторов, влияющих на холодопроизводительность ПКХМ в нестационарном процессе охлаждения низкотемпературной камеры, была проведена серия экспериментов с различной тепловой нагрузкой на ПКХМ. На рисунке 5 представлены графики зависимости холодопроизводительности ПКХМ от температуры воздуха в рабочем объёме низкотемпературной камеры при различной тепловой нагрузке на ПКХМ, эмитируемой электронагревателем, от 0 до 175 Вт.

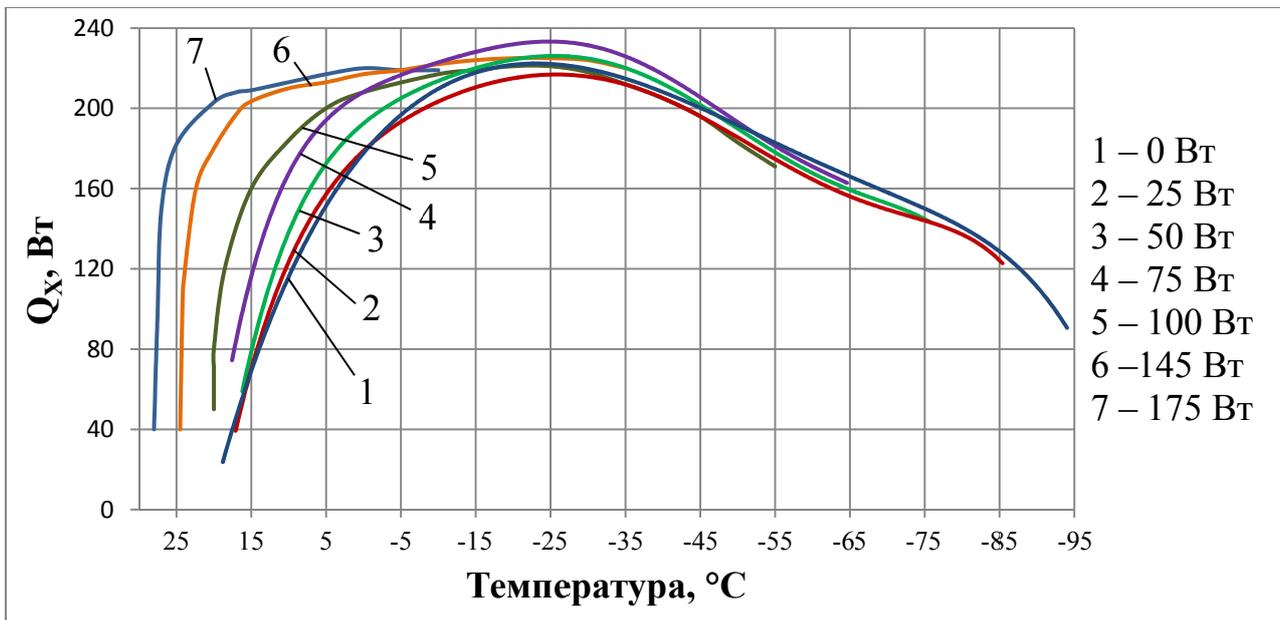


Рис. 5. Зависимость холодопроизводительности ПКХМ от температуры воздуха в рабочем объёме камеры при различной тепловой нагрузке

При температуре воздуха в рабочем объёме низкотемпературной камеры ниже минус 10 °С значения холодопроизводительности ПКХМ при различных значениях тепловой нагрузки отличаются друг от друга не более чем на 10%, несмотря на существенно различающуюся скорость охлаждения низкотемпературной камеры.

Таким образом, проведённые экспериментальные исследования позволяют сделать вывод, что холодопроизводительность ПКХМ в нестационарном процессе охлаждения низкотемпературной камеры в основном зависит от температуры воздуха в её рабочем объёме, что даёт основание для использования разработанной выше методики расчёта характеристик ПКХМ на многокомпонентных смесях хладагентов для расчёта переходных процессов в низкотемпературных камерах.

Были проведены экспериментальные исследования изменения холодопроизводительности ПКХМ от концентрации компонентов рабочей смеси и общего количества её заправки. Графики зависимости холодопроизводительности ПКХМ от температуры воздуха в рабочем объёме низкотемпературной камеры при различной мольной концентрации компонентов тройной смеси R142b, R22, R14 и различном общем количестве её заправки представлены на рисунках 6-9.

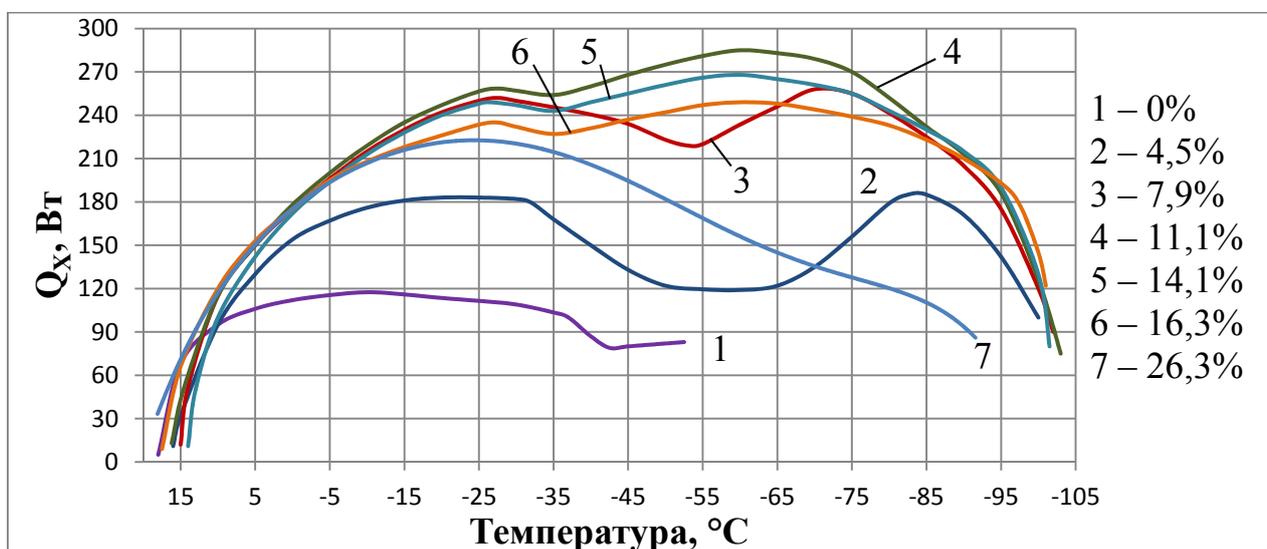


Рис. 6. Зависимость холодопроизводительности ПКХМ от температуры воздуха в рабочем объёме камеры при различной концентрации R142b

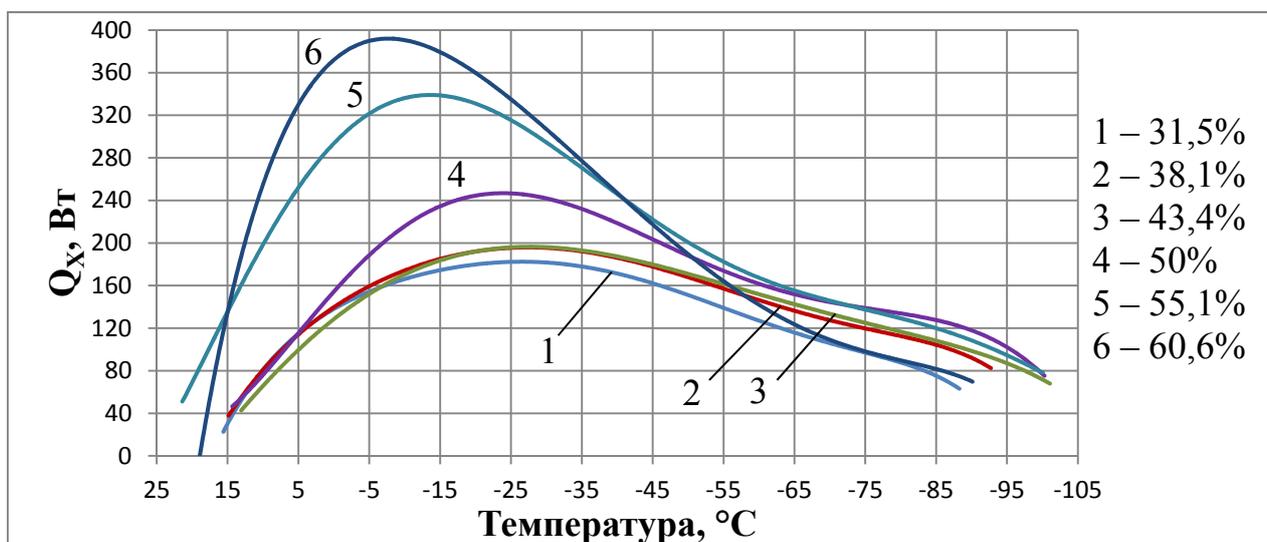


Рис. 7. Зависимость холодопроизводительности ПКХМ от температуры воздуха в рабочем объёме камеры при различной концентрации R22

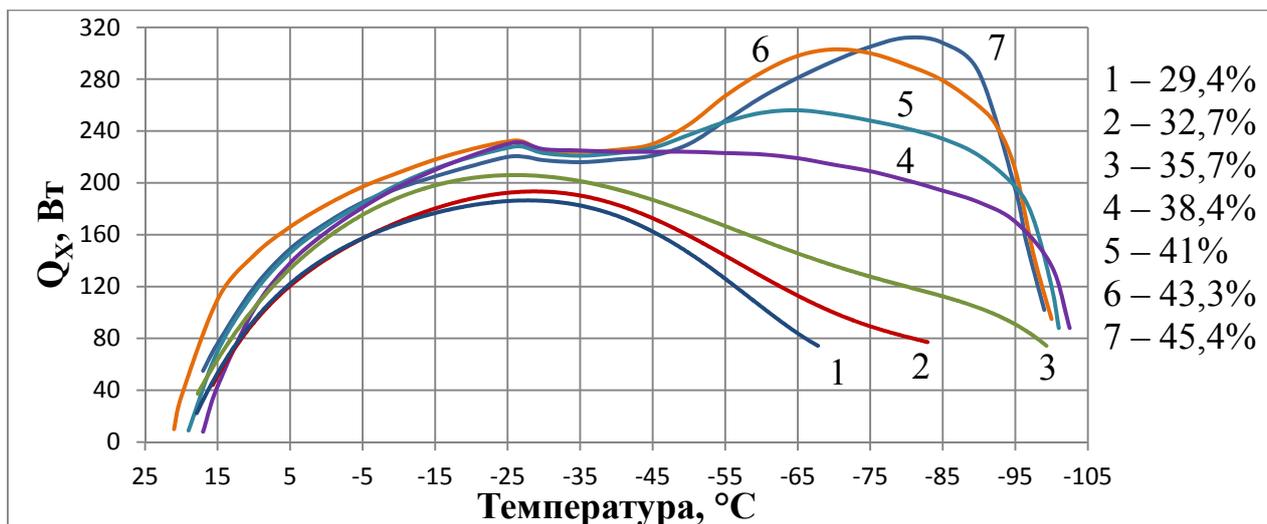


Рис. 8. Зависимость холодопроизводительности ПКХМ от температуры воздуха в рабочем объёме камеры при различной концентрации R14

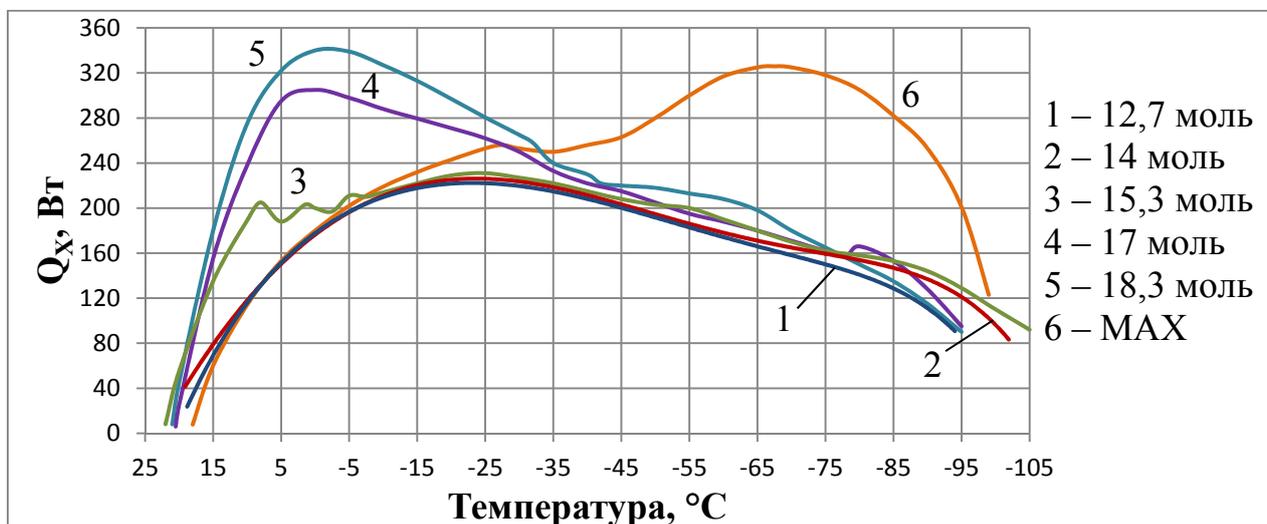


Рис. 9. Зависимость холодопроизводительности ПКХМ от температуры воздуха в рабочем объёме камеры при различном количестве заправки рабочей смеси

На основе результатов проведённых экспериментальных исследований была подобрана смесь, обеспечивающая максимальное значение холодопроизводительности ПКХМ на низких температурных уровнях (минус 70... минус 95 °С). Мольный состав смеси: R142b – 11%, R22 – 46%, R14 – 43%; общее количество заправки – 15,3 моль. Результаты испытаний низкотемпературной камеры на данной смеси хладагентов и величине заправки представлены на рисунке 9 (график обозначен как «МАХ»). Из результатов испытаний видно, что холодопроизводительность ПКХМ при температуре воздуха в рабочем объёме низкотемпературной камеры минус 70... минус 95 °С выше, чем во всех проведённых до этого испытаниях.

На рисунке 10 в координатах Т-і представлено изображение расчётного цикла ПКХМ. Также на рисунке 10 на изобарах расчётного цикла для сравнения отмечены точки цикла, определённые экспериментально. Номера точек соответствуют схеме на рисунке 1. Данные циклы построены для температуры воздуха в рабочем объёме низкотемпературной камеры минус 90

°С. Влияние перепускной линии на работу ПКХМ при расчёте цикла не учитывалось.

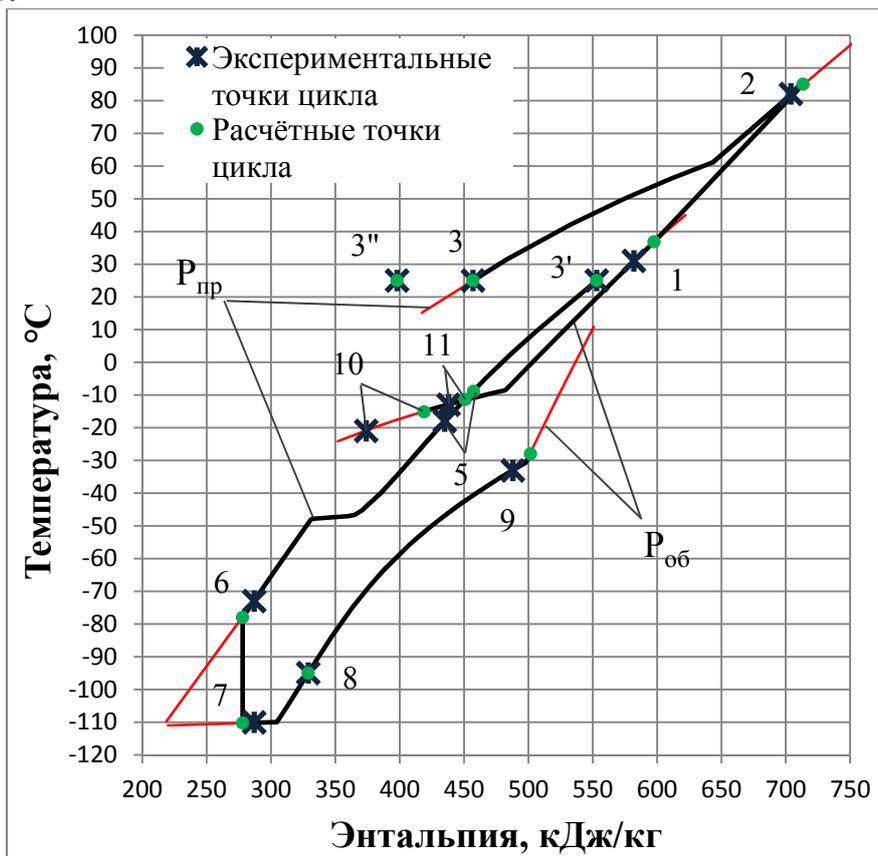


Рис. 10. Цикл ПКХМ на многокомпонентных смесях хладагентов

Параметры ПКХМ, принятые при расчёте цикла определялись исходя из характеристик компрессора и теплообменных аппаратов ПКХМ, использованных при создании экспериментального стенда. Параметры расчётного цикла и параметры, полученные в ходе эксперимента, приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Параметры цикла

	Теор. цикл	Действ. цикл
Холодопроизводительность	136 Вт	145 Вт
Мощность, потребляемая компрессором	712 Вт	635 Вт
Холодильный коэффициент	0,191	0,228
Степень термодинамического совершенства	0,115	0,137

На рисунке 11 представлены расчётные и экспериментальные зависимости температуры воздуха в рабочем объёме низкотемпературной камеры от времени для двух составов рабочего тела: исходного (R142b – 23.4%, R22 – 40.9%, R14 – 35,7%) и позволяющего получать максимальную холодопроизводительность на низких температурных уровнях (R142b – 11%, R22 – 46%, R14 – 43%).

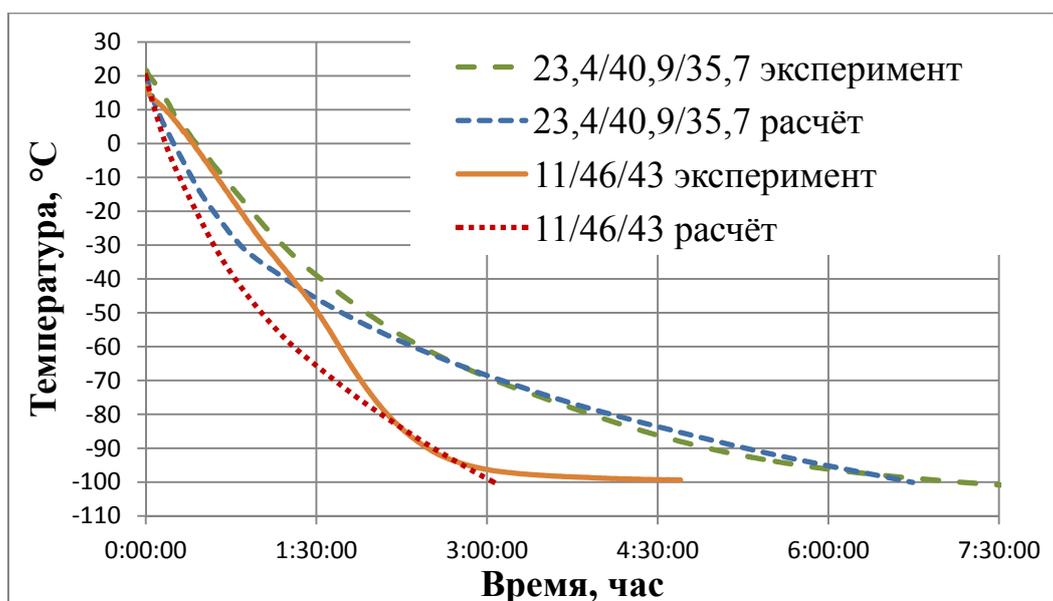


Рис. 11. Зависимость температуры воздуха в рабочем объёме камеры от времени

Проведённое сравнение позволяет сделать вывод, что разработанная методика расчёта холодопроизводительности ПКХМ на многокомпонентных смесях хладагентов на различных температурных уровнях может быть использована для расчетной оценки переходных процессов в низкотемпературной камере с ПКХМ на многокомпонентных смесях хладагентов, в том числе, загруженной объектами охлаждения.

Выводы

1. На основе термического уравнения состояния Редлиха-Квонга-Соаве и линейных правил смешения по методу бинарных взаимодействий разработана методика и компьютерная программа расчетно-теоретического анализа цикла ПКХМ на смесях хладагентов. Подтверждена правомерность применения разработанной методики расчета характеристик ПКХМ на смесях хладагентов для расчета нестационарных процессов в низкотемпературных камерах.

2. На основе двумерного уравнения теплопроводности разработана методика и компьютерная программа расчета нестационарных процессов переноса тепла в теплоизолированных корпусах низкотемпературных камер. Данная программа позволяет рассчитывать холодопроизводительность ПКХМ в процессе охлаждения низкотемпературных камер, а также определять зависимость температуры воздуха в рабочем объёме камеры от времени по известной холодопроизводительности ПКХМ на различных температурных уровнях термостатирования.

3. Проведены экспериментальные исследования динамических характеристик ПКХМ на тройной смеси хладагентов: R142b, R22, R14. Показано, что холодопроизводительность ПКХМ на смесях хладагентов в нестационарных процессах охлаждения низкотемпературных камер в основном зависит от температуры воздуха в их рабочем объеме.

4. Проведены экспериментальные исследования влияния состава смеси хладагентов и общего количества её заправки на

холодопроизводительность ПКХМ в процессе охлаждения низкотемпературной камеры. Показано, что существует оптимальная концентрация высококипящего компонента, обеспечивающая максимальную холодопроизводительность ПКХМ во всем диапазоне рабочих температур воздуха в рабочем объеме низкотемпературной камеры; для исследуемой смеси хладагентов оптимальная концентрация R142b составила 11,1%. Соотношение концентраций низкокипящих компонентов определяет область рабочих температур воздуха в рабочем объеме низкотемпературной камеры, при которых обеспечивается максимальная холодопроизводительность ПКХМ. Для исследуемой смеси максимальная холодопроизводительность может достигаться в области от минус 10 °С до минус 80 °С. Оптимальное общее количество заправки составило: $v_{\text{общ}} = 15,3$ моль или $v_{\text{уд}} = v_{\text{общ}}/V_{\text{хм}} = 0,796$ моль/л.

5. На основании проведенных исследований определен состав смеси хладагентов, обеспечивающий максимальную холодопроизводительность ПКХМ в нестационарном процессе охлаждения низкотемпературной камеры в диапазоне температур воздуха в рабочем объеме минус 70 ... минус 95 °С: R142b – 11%, R22 – 46%, R14 – 43%.

6. Увеличение холодопроизводительности ПКХМ на низких температурных уровнях стало возможным благодаря применению предложенной схемы ПКХМ. Применение данной схемы позволило увеличить содержание низкокипящего компонента R14 с 35,7% до 43% и общее количество заправки с 12,375 до 15,3 моль в смеси, изначально подобранной для работы на температурный уровень минус 90 °С.

Публикации по теме диссертации

1. Жердев А.А., Кротов А.С., Макаров Б.А. Сравнение рефрижераторных циклов на многокомпонентных смесях хладагентов с предварительным и промежуточным дросселированием // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Машиностроение. 2008. Спец. вып. Холодильная и криогенная техника, системы кондиционирования и жизнеобеспечения. С. 143-150.

2. Макаров Б.А., Кротов А.С., Жердев А.А. Математическое моделирование динамических тепловых характеристик холодильной камеры // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Машиностроение. 2010. Спец. вып. Холодильная и криогенная техника, системы кондиционирования и жизнеобеспечения. С. 147-154.

3. Жердев А.А., Кротов А.С., Макаров Б.А. Методика исследования изменения производительности парокомпрессионных холодильных машин на многокомпонентных смесях хладагентов при захолаживании объектов // Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке.: Матер. IV Междун. научно-техн. конф. Санкт-Петербург, 2009. С. 66-68.

4. Кротов А.С. Исследование динамических характеристик парокомпрессионных холодильных машин на смесях хладагентов // Инновационные разработки в области техники и физики низких температур.: Сборн. тез. докл. Междун. конф. Москва.: МГУИЭ. 2010. С. 218-220.

5. Кротов А.С. Исследование динамических характеристик парокомпрессионных холодильных машин // Империя холода. 2011. №1. С. 41.