

**На правах рукописи
УДК 621.565.6; 621.565.923**

Бычков Евгений Геннадьевич

**РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСНОГО ПОДХОДА К
ПРОЕКТИРОВАНИЮ ДРОССЕЛЬНЫХ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ
ХОЛОДИЛЬНЫХ МАШИН НА МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ
СМЕСЯХ ХЛАДАГЕНТОВ**

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

**АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**



Москва – 2021

Работа выполнена на кафедре холодильной, криогенной техники, систем кондиционирования и жизнеобеспечения в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана).

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,
декан факультета «Энергомашиностроение»
МГТУ им. Н.Э. Баумана
Жердев Анатолий Анатольевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор,
главный научный сотрудник
ООО «Газпром ВНИИГАЗ»
Горбачев Станислав Прокофьевич

доктор технических наук, профессор
кафедры «Инженерия процессов, аппаратов,
холодильной техники и технологии»
ФГБОУ ВО «МГУПП»
Бабакин Борис Сергеевич

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет» (Московский Политех)

Защита состоится «__» _____ 20__ года в _____ на заседании Диссертационного совета Д 212.141.16 при МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, Лефортовская наб., д.1, корпус «Энергомашиностроение», 3 этаж, Конференц-зал кафедры холодильной, криогенной техники, систем кондиционирования и жизнеобеспечения.

С диссертацией до защиты можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте www.bmstu.ru.

Ваши отзывы в 2-х экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: 105005, г. Москва, ул. 2-ая Бауманская, д.5., стр. 1, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.141.16.

Автореферат разослан «__» _____ 20__ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.141.16
кандидат технических наук, доцент

О.В. Белова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы Непрерывная генерация холода в температурном диапазоне $-90\ldots-160\text{ }^{\circ}\text{C}$ является достаточно сложной технической задачей, поскольку данные температуры существенно ниже области одноступенчатых дроссельных холодильных машин, но, с другой стороны, выше традиционных «азотных» систем, использующих расширительные машины или холод жидкого азота. Каскадирование дроссельного холодильного цикла неизбежно ведет к многократному усложнению холодильной машины, снижению ее надежности и энергоэффективности, возрастанию стоимости производства и эксплуатации. Холодильные и криогенные установки использующие детандеры или жидкий азот широко используются в различных приложениях, главным образом для создания температур в диапазоне $-190\ldots-200\text{ }^{\circ}\text{C}$, и их адаптация на более высокий температурный уровень приводит к дополнительным затратам, снижающим энергоэффективность системы в целом. Более того, для систем малой производительности такие криогенные установки малооправданы ввиду их высокой стоимости и сложности эксплуатации, требующей специально подготовленного персонала. Поэтому, создание таких энергоэффективных холодильных машин для термостатирования объектов на уровне температур $-90\ldots-160\text{ }^{\circ}\text{C}$, применяемых в медицине, процессах машиностроения, энергетике, оборонно-промышленном комплексе, является в настоящее время актуальной и востребованной задачей.

Одними из наиболее простых в конструктивном отношении являются дроссельные низкотемпературные холодильные машины (ДНХМ). Однако термодинамические и энергетические характеристики дроссельного цикла, использующего в качестве рабочего тела однокомпонентный хладагент, низки, что неизбежно ведет к значительному увеличению энергопотребления и массогабаритных характеристик. Одним из перспективных направлений развития ДНХМ, является применение в них в качестве рабочего тела многокомпонентных смесей хладагентов (МСХ), обладающих бóльшим дроссельным эффектом, меньшей работой сжатия в компрессоре и более высокой степенью термодинамического совершенства, в сравнении с однокомпонентным хладагентом.

Теоретическими и экспериментальными исследованиями ДНХМ на МСХ занимались отечественные ученые В.М. Бродянский, А.Д. Суслов, С.Д. Глухов, А.А. Жердев, А.П. Клименко, Г.К. Лавренченко, Е.С. Навасардян, А.С. Кротов и зарубежные ученые D.J. Missimer, M.Q. Gong, G. Venkatarathnam, N. L. Narasimhan, L. Zhao, J. Lio, M.D. Atrey, B. Sreenivas, E. Luo. Анализ научных публикаций показывает, что применение МСХ вместо однокомпонентных хладагентов позволяет снизить удельные затраты электроэнергии в 1,5-2 раза, а также в 2-3 раза улучшить массогабаритные характеристики ДНХМ.

Для реализации процесса термостатирования объектов при вышеуказанных температурах необходимо формирование расслаивающихся при низких температурах МСХ с более чем тремя компонентами, обеспечивающих температуру кипения в испарителе $T=idem$. Это усложняет создание таких ДНХМ из-за необходимости решения комплекса взаимосвязанных между собой задач на расчетных и экспериментальных этапах работ, ключевые из которых: выбор схемного решения ДНХМ; расчет термодинамических свойств МСХ; определение «расчетного циркулирующего» (определяемого в ходе расчета и оптимизации параметров цикла) и количественного «заправляемого» составов МСХ; обеспечение соответствия фактического состава МСХ, «циркулирующего» в контуре ДНХМ на стационарном режиме, «расчетному циркулирующему» составу.

Несмотря на то, что ДНХМ на МСХ создаются и применяются уже значительное время, в настоящий момент в литературе не представлены методы расчетного определения «заправляемого» количественного состава расслаивающихся МСХ и способы обеспечения «расчетного циркулирующего» состава на стационарном режиме работы, применимые для МСХ с количеством компонентов более 2-3. Это определяет актуальность разработки комплексного подхода к проектированию ДНХМ на МСХ для термостатирования объектов при температурах до -160°C в целях дальнейшего повышения их энергоэффективности, снижения массогабаритных характеристик, а также минимизации временных и материальных затрат, необходимых на их создание.

Объект исследования – ДНХМ на пятикомпонентной азот-углеводородной МСХ.

Предмет исследования – методика обеспечения и контроля расчетных параметров МСХ во всех процессах рабочего цикла ДНХМ.

Цель работы – разработка комплексного подхода к проектированию и исследование дроссельной низкотемпературной холодильной машины на многокомпонентных смесях хладагентов для термостатирования объектов при температуре до -160°C .

Основные задачи

1. Создание усовершенствованной схемы ДНХМ на МСХ для термостатирования объектов при температуре до -160°C .

2. Разработка методики расчета цикла ДНХМ на МСХ, включающего определение количественного состава «заправляемой» МСХ.

3. Разработка технологического алгоритма обеспечения соответствия состава МСХ, «циркулирующего» на стационарном режиме работы ДНХМ, «расчетному циркулирующему» составу.

4. Создание экспериментального стенда для экспериментального исследования работы ДНХМ на МСХ.

5. Экспериментальное исследование работы ДНХМ в широком диапазоне параметров и составов МСХ для верификации расчетной методики и отработки технологического алгоритма.

6. Сопоставление результатов расчетных и экспериментальных исследований.

7. Разработка рекомендаций по комплексному проектированию ДНХМ на МСХ для термостатирования различных объектов при температурах $-90\ldots-160\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Научная новизна

1. Разработана новая методика расчетного определения заправляемого количественного состава многокомпонентного смесового хладагента в дроссельной низкотемпературной холодильной машине.

2. Предложен новый технологический алгоритм обеспечения расчетного циркулирующего состава многокомпонентного смесового хладагента в замкнутом контуре дроссельной низкотемпературной холодильной машины на стационарном режиме работы.

3. На основе экспериментальных данных созданы регрессионные модели определения оптимальных характеристик дроссельных низкотемпературных холодильных машин на многокомпонентных смесовых хладагентах в зависимости от концентраций компонентов, циркулирующих в замкнутом контуре.

Практическая значимость

1. Предложена схема цикла ДНХМ на МСХ, а также система регулирования давления всасывания и состава МСХ, защищенные патентами на изобретение.

2. Разработан комплекс компьютерных программ для расчета параметров цикла ДНХМ на МСХ, а также расчёта «заправляемого» состава МСХ для сокращения затрат при создании новых ДНХМ.

3. Определены оптимальные значения параметров ДНХМ на пятикомпонентной МСХ (R600a, R290, R170, R50, R728).

4. Предложенные методика расчетного определения «заправляемого» количественного состава МСХ и технологический алгоритм обеспечения «расчетного циркулирующего» состава МСХ применимы для широкого ряда ДНХМ на МСХ малой производительности.

5. Полученные в результате регрессионного анализа модели могут быть использованы при создании ДНХМ малой производительности (объёмная производительность компрессора до $25\text{ м}^3/\text{ч}$), работающих по схожим схемам циклов с аналогичными или близкими составами рабочих тел, и обеспечивающих режим термостатирования при температурах до -160°C .

6. Разработаны рекомендации по комплексному проектированию ДНХМ на МСХ для термостатирования различных объектов при температурах $-90\ldots-160\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Внедрение результатов работы Результаты работы внедрены в АО «ЦНИИ «Курс» в процессе разработки низкотемпературного оборудования и постановки его на производство в ООО «КМЗ», ООО «ГРАН», ПАО «Электромеханика». Созданы опытно-промышленные и серийные образцы низкотемпературного оборудования, применяемые в

медицине и машиностроении, а также при проведении испытаний, исследований и для решения задач термостатирования.

Достоверность и обоснованность полученных результатов

Достоверность и обоснованность полученных результатов обеспечивались применением поверенного контрольно-измерительного оборудования и апробированных методик измерения, воспроизводимостью получаемых результатов при повторных исследованиях. Основные уравнения, применяемые при построении математических моделей, базируются на фундаментальных законах сохранения и уравнениях термодинамики.

На защиту выносятся:

1. Предложенная усовершенствованная схема ДНХМ на МСХ для термостатирования объектов при температурах до -160°C , обеспечивающая расчетные параметры МСХ во всех процессах рабочего цикла ДНХМ при поддержании допустимых температурных условий работы электродвигателя серийно-выпускаемых компрессоров.

2. Новая методика расчета ДНХМ на МСХ, включающая определение количественного состава заправляемой МСХ.

3. Новый технологический алгоритм обеспечения соответствия состава МСХ, «циркулирующего» на стационарном режиме работы ДНХМ, «расчетному циркулирующему» составу.

4. Результаты теоретических и экспериментальных исследований, подтверждающие возможность создания низкотемпературного оборудования с ДНХМ на МСХ на базе серийно-выпускаемых компрессоров для термостатирования объектов при температурах до -160°C .

5. Рекомендации по комплексному проектированию ДНХМ на МСХ для термостатирования различных объектов при температурах $-90...-160^{\circ}\text{C}$.

Апробация работы Основные положения и результаты докладывались и обсуждались на:

1. IX Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России», Россия, Москва, 2016.

2. Международной конференции «Современные проблемы теплофизики и энергетики», Россия, Москва, 2017.

3. Научно-практической конференции с международным участием «Холодильная, криогенная техника, системы кондиционирования и жизнеобеспечения», Россия, Москва, 2018.

4. 47-й Международной выставке изобретений «Inventions Geneva», Швейцария, г. Женева, 2019.

5. 25-м международном Конгрессе по холодильной технике, Канада, Монреаль, 2019.

6. 3-й международной научно-практической конференции «Холодильная и криогенная техника, системы кондиционирования и жизнеобеспечения», посвященная 100-летию кафедры Э4, Россия, Москва, 2019.

Личный вклад автора заключается в создании методики расчета ДНХМ на МСХ, включающей определение количественного состава «заправляемой» расслаивающейся МСХ, разработке нового технологического алгоритма обеспечения «расчётного циркулирующего» состава на стационарном режиме работы ДНХМ, создании экспериментального стенда с ДНХМ на МСХ, проведении экспериментальных исследований, сопоставлении расчетных и экспериментальных данных, выработке рекомендаций по комплексному проектированию ДНХМ на МСХ.

Структура и объем работы Диссертация состоит из введения, четырёх глав, выводов, списка литературы из 143 наименований, приложения и содержит 176 страниц основного текста, 51 рисунок, 22 таблицы.

Соответствие паспорту специальности В работе исследуется холодильная машина нового схемного решения, а также расчетные и экспериментальные этапы создания таких холодильных машин. Тема работы полностью соответствует п. 1, 2 и 3 паспорта специальности 05.04.03. – «Машины и аппараты, процессы холодильной и криогенной техники, систем кондиционирования и жизнеобеспечения».

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первая глава содержит анализ научных публикаций, посвященных применению и методам расчёта дроссельных низкотемпературных холодильных машин на многокомпонентных смесях хладагентов для термостатирования объектов.

В настоящее время существует значительное число направлений, использующих технологии охлаждения на базе применения ДНХМ замкнутого цикла на МСХ, основными преимуществами которых являются автономность, энергоэффективность, простота конструкции, малые вес и габариты, стабильность уровня термостатирования и простота стыковки холодной части с объектом охлаждения (п. 1.1.).

В результате анализа особенностей разработки и опыта создания низкотемпературного оборудования на базе таких ДНХМ (п. 1.2.) было определено, что процесс их проектирования требует решения взаимосвязанных задач на этапах расчетных и экспериментальных работ: расчет цикла ДНХМ и термодинамических свойств МСХ, расчет количественного «заправляемого» состава МСХ и итерационная корректировка «заправляемого» состава МСХ для достижения соответствия «циркулирующего» состава МСХ «расчетному циркулирующему». Эти работы нацелены на определение необходимого состава рабочего тела и количественной величины его заправки, определяющих характеристики ДНХМ: величину холодопроизводительности, степень термодинамического совершенства и др. Отмечается, что экспериментальная доработка новых ДНХМ требуют значительного количества ресурсов и времени. В ходе анализа подходов к формированию МСХ в работах С.Д. Глухова,

Е.С. Навасардян, А.С. Кротова и D.J. Missimer был выделен ряд критериев для качественного выбора компонентного состава рабочего тела (п. 1.3.). Определено, что для холодильных машин, обеспечивающих работу в режиме термостатирования предпочтительны компоненты МСХ, образующие растворы с ограниченной растворимостью (расслаивающиеся) на температурном уровне охлаждения.

Анализ схемных решений применительно к рассматриваемой задаче определил перспективность разработки ДНХМ на базе цикла Линде-Хемпсона с предварительным охлаждением (п. 1.4.). В ДНХМ на МСХ малой производительности (объёмная производительность компрессора до $25 \text{ м}^3/\text{ч}$) в целях обеспечения компактности и надежности используют серийно-выпускаемые одноступенчатые поршневые герметичные холодильные компрессоры. При этом, их область эффективного применения ограничивается величинами степени сжатия не более ~ 12 и предельного рабочего давления нагнетания не более ~ 30 бар, определяемых прочностными характеристиками и допустимыми температурными условиями работы встроенных электродвигателей. Эти условия выполняются при применении в качестве рабочего тела МСХ.

Обзор методов определения «заправляемого» состава МСХ в ДНХМ и методов обеспечения оптимального «циркулирующего» состава МСХ на стационарном режиме, предлагаемых G. Venkatarathnam, M.Q. Gong, L. Zhao, выявил несоответствие состава МСХ, «циркулирующего» в рабочем контуре в установившемся (стационарном) режиме работы, по отношению к «заправленному» составу (п. 1.5.).

Анализ методов обеспечения соответствия состава МСХ, циркулирующего на стационарном режиме работы ДНХМ, «расчетному циркулирующему» составу в работах G. Venkatarathnam, N. L. Narasimhan и J. Lio показал, что они позволяют получить приемлемый результат, но требуют значительных временных и материальных затрат на проведение экспериментальных исследований (п. 1.6.). В то же время, их применение в ДНХМ для МСХ с количеством компонентов более 2-3, используемых в качестве рабочих тел ДНХМ для достижения температур до -160°C , крайне затруднительно в связи с необходимостью выполнения более 10-15 промежуточных итераций по заправке компонентов МСХ и отсутствием методов расчетного определения «заправляемого» состава расслаивающихся МСХ. Исходя из этого, для минимизации временных и материальных затрат, затрачиваемых в ходе создания новых энергоэффективных ДНХМ для термостатирования объектов при температурах до -160°C , целесообразна разработка комплексного подхода, предлагающего решение вышеописанных, взаимосвязанных между собой, задач.

В конце гл. 1 формулируются цель и основные задачи работы, указывается, что для апробации методик требуется создание экспериментального стенда на базе реальной ДНХМ на МСХ, обеспечивающей термостатирование объектов при температуре до -160°C .

Вторая глава посвящена расчетно-теоретическому исследованию ДНХМ на МСХ, охватывающему методы расчета: термодинамических свойств расслаивающихся МСХ, цикла ДНХМ, «заправляемого» состава МСХ, а также описание предлагаемой усовершенствованной схемы ДНХМ на МСХ и предлагаемого технологического алгоритма корректировки «циркулирующего» состава МСХ на экспериментальном этапе проектирования.

При проведении расчетно-теоретических исследований ДНХМ на МСХ необходимы данные по термодинамическим свойствам их рабочих тел, которые, как правило, в литературе отсутствуют. Для получения этих данных разработана методика расчета фазовых равновесий и термодинамических свойств МСХ, а также проведен сравнительный анализ уравнений состояния, применяемых для определения свойств МСХ, образующих систему «пар-жидкость-жидкость» в области температур термостатирования. Полная система уравнений, определяющая параметры состояния системы «пар-жидкость-жидкость» МСХ включает в себя уравнения состояния для паровой и жидких фаз, уравнения материального баланса и уравнения, описывающие равенство летучестей компонентов МСХ в фазах (1). Для расчета параметров фазового равновесия МСХ и их термодинамических свойств с использованием различных уравнений состояния была разработана компьютерная программа для решения системы уравнений (1) методом Ньютона применительно к расслаивающимся МСХ.

$$\left\{ \begin{array}{l} \ln f_{1i}'' - \ln f_i' = 0 ; \ln f_{2i}'' - \ln f_i' = 0 \\ z_{0i} - X y_i - \alpha_1 x_{1i} - \alpha_2 x_{2i} = 0 \\ X + \alpha_1 + \alpha_2 = 1 \\ \pi - \frac{\tau}{\zeta_k} \left\{ \frac{1}{v_1' - b_{ж1}} - \frac{a_{ж1}}{v_1'(v_1' + b_{ж1})} \right\} = 0 \\ \pi - \frac{\tau}{\zeta_k} \left\{ \frac{1}{v_2' - b_{ж2}} - \frac{a_{ж2}}{v_2'(v_2' + b_{ж2})} \right\} = 0 \\ \pi - \frac{\tau}{\zeta_k} \left\{ \frac{1}{v'' - b_{п}} - \frac{a_{п}}{v''(v'' + b_{п})} \right\} = 0 \\ \sum y_i - 1 = 0 ; i = 1 \dots n \end{array} \right. \quad (1)$$

где $a_{п}$, $b_{п}$, $a_{ж1}$, $b_{ж1}$, $a_{ж2}$, $b_{ж2}$ - параметры состояния МСХ для паровой и жидкой фазы соответственно в уравнении состояния Редлиха-Квонга в модификации Соаве; v_1' , v_2' , v'' - удельные мольные объёмы жидких и паровой фазы соответственно; α_1 , α_2 - мольные доли расслаивающихся жидких фаз соответственно; x_{1i} , x_{2i} - мольные концентрации жидких фаз соответственно; X - паросодержание; f_{1i}'' , f_{2i}'' - летучести i -го компонента жидких фаз; f_i' - летучесть i -го компонента паровой фазы; τ , π - приведенные температуры и давления; ζ_k - коэффициент сжимаемости в критической точке.

На основании проведённых исследований и учитывая особенности работы и недостатки существующих ДНХМ, была разработана усовершенствованная схема цикла ДНХМ на МСХ, а также ряд дополнительных схемных решений, защищённых патентами на изобретение (№RU 2743653 и др.) – Рисунок 1 (п. 2.2.). Главное преимущество разработанной схемы заключается в применении ступенчатого охлаждения с оптимальным составом МСХ в испарителе ДНХМ при поддержании допустимых температурных условий работы электродвигателя компрессора в автоматическом режиме без внешних дополнительных устройств охлаждения. Это обеспечивает возможность применения в указанной схеме ДНХМ серийно-выпускаемых одноступенчатых компрессоров.

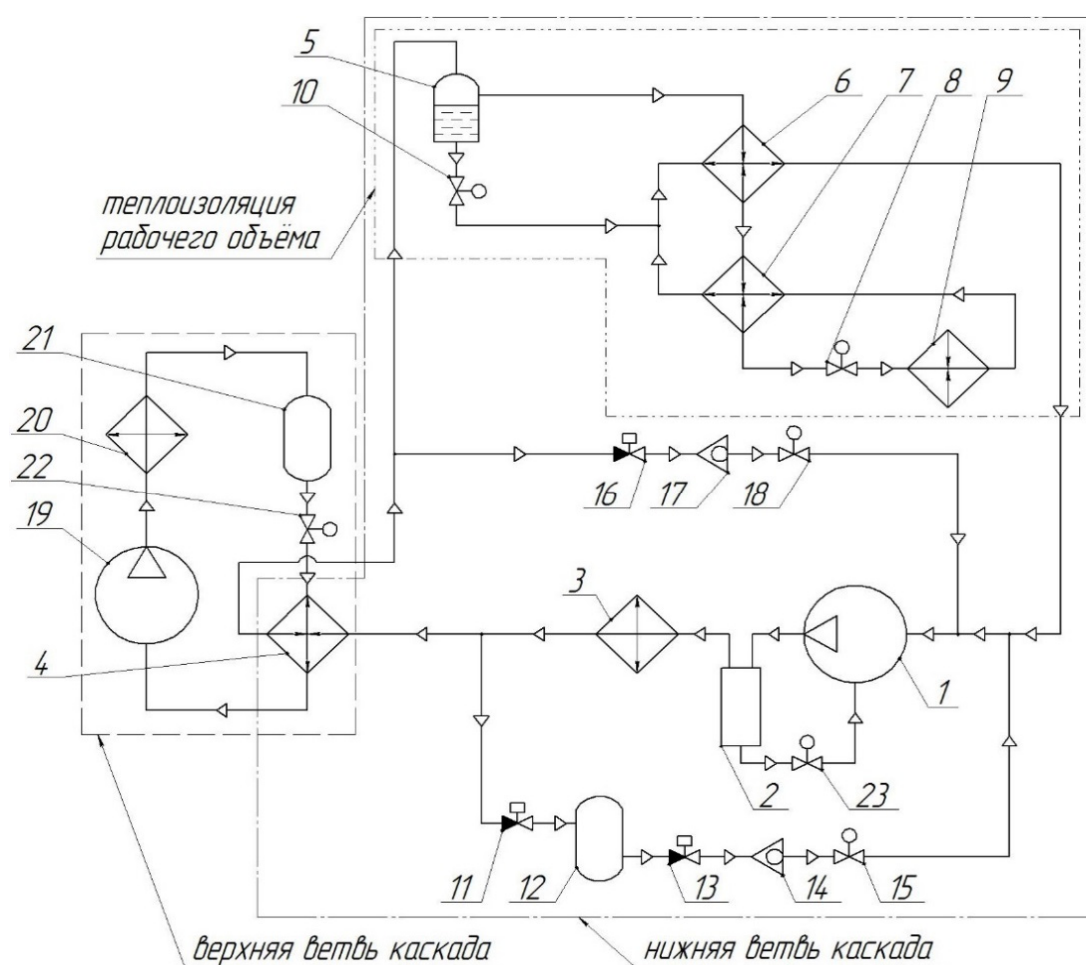


Рисунок 1. Комбинированная схема ДНХМ на МСХ:

1,19 – компрессора: нижнего каскада и верхнего каскада; 2 – маслоотделитель; 3,20 – воздушные конденсаторы: нижнего и верхнего каскадов; 4 – конденсатор – переохладитель; 5 – отделитель жидкости; 6,7 – рекуперативные теплообменники: основной и предварительный; 8,10,15,18,22,23 – дросселирующие устройства: основное, предварительное, дополнительное, линии термостабилизации, верхнего каскада и масляной линии; 9 – испаритель; 11,13,16 – соленоидные вентили: входной, выходной и линии термостабилизации; 12,21 – ресиверы: перепускной и верхнего каскада; 14,17 – обратные клапаны: перепускной и линии термостабилизации.

В п. 2.3. приведена методика расчета цикла ДНХМ на МСХ при его математическом моделировании для схемы на рисунке 1.

В п. 2.4. предлагается новая методика определения количественного состава «заправляемой» МСХ при заданном «расчётном циркулирующем» составе МСХ.

Для определения характеристик потока МСХ при малых скоростях движения, в одномерном приближении, при пренебрежении гидравлическим сопротивлением достаточно отдельно рассмотреть уравнение конвективного теплообмена:

$$G \frac{dh}{dl} = \frac{KF}{L} (T_0 - T) \quad (2)$$

где G – массовый расход хладагента; h – удельная энтальпия потока хладагента; l – пространственная координата в направлении потока; K – коэффициент теплопередачи; F – площадь теплопередающей поверхности; L – общая длина канала; T – усредненная по сечению текущая температура потока хладагента; T_0 – температура внешней среды.

Для двухфазного потока хладагента при постоянном давлении удельная энтальпия является функцией температуры T и массового паросодержания X , при этом полная производная от удельной энтальпии по пространственной координате будет иметь вид:

$$\frac{dh}{dl} = \frac{\partial h}{\partial T} \frac{dT}{dl} + \frac{\partial h}{\partial X} \frac{dX}{dl} \quad (3)$$

При пренебрежении гидравлическим сопротивлением полная производная от энтальпии по пространственной координате принимает вид:

$$\frac{dh}{dl} = \left(\frac{\partial h}{\partial T} - \frac{\partial h}{\partial X} \frac{\partial P}{\partial T} / \frac{\partial P}{\partial X} \right) \frac{dT}{dl} \quad (4)$$

Подставляя полученное выражение для производной энтальпии по температуре в уравнение (2), получим:

$$G \left(\frac{\partial h}{\partial T} - \frac{\partial h}{\partial X} \frac{\partial P}{\partial T} / \frac{\partial P}{\partial X} \right) \frac{dT}{dl} = \frac{KF}{L} (T_0 - T), \quad (5)$$

При допущении, что на установившемся (стационарном) режиме парожидкостная смесь находится в равновесном состоянии относительно усредненной по поперечному сечению канала температуре потока МСХ, уравнение (5) совместно с уравнениями состояния для паровой и жидкой фазы, а также условиями равновесия фаз (равенство химических потенциалов паровой и жидкой фазы) образуют полную систему уравнений, определяющую термодинамические параметры потока МСХ в каждом сечении рабочего контура ДНХМ: паросодержание, удельные объёмы паровой ϑ'' и жидкой ϑ' фазы, энтальпии и энтропии паровой и жидкой фазы, а для МСХ – массовые (мольные) концентрации компонентов при заданном «расчётном циркулирующем» составе МСХ.

Общее количество «заправленной» МСХ равно интегралу по рабочему контуру ДНХМ:

$$M_{\Sigma} = \oint \frac{S(l)}{\vartheta} dl, \quad (6)$$

где $S(l)$ – текущее значение площади проходного сечения рабочего контура ДНХМ (Рисунок 2); ϑ – удельный объем парожидкостной смеси.

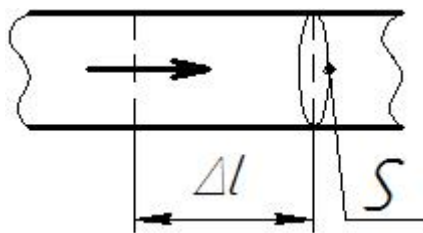


Рисунок 2. Элемент рабочего контура ДНХМ

Масса каждого «заправленного» компонента МСХ определяется суммой интегралов для каждой из фаз:

$$M_i = \oint \frac{X y_i}{\vartheta} S(l) dl + \oint \frac{(1 - X) x_i}{\vartheta} S(l) dl, \quad (7)$$

Зависимости (6) и (7) устанавливают функциональную связь между «расчётным циркулирующим» составом МСХ и количественным и качественным составом «заправленного» МСХ в рабочий контур ДНХМ. Количественное определение этой взаимосвязи связано с решением системы уравнений, описывающей изменение температуры МСХ по рабочему контуру ДНХМ, уравнений состояния для паровой и жидкой фазы, а также уравнений фазового равновесия компонентов МСХ. Приблизительно эту взаимосвязь можно установить на основе анализа цикла ДНХМ, введя понятия условного интегрального коэффициента теплопередачи. В п. 2.4. на примере рекуперативного теплообменного аппарата приведен расчет количества МСХ в элементе рабочего контура ДНХМ в соответствии с предлагаемым методом. Отмечена также возможность совершенствования метода путем применения условного коэффициента теплопередачи для каждого участка разбиения, определяемого через местные коэффициенты теплоотдачи при кипении и конденсации.

В п. 2.5. предлагается новый технологический алгоритм обеспечения соответствия состава МСХ, «циркулирующего» на стационарном режиме работы ДНХМ, «расчетному циркулирующему» составу. Алгоритм основан на расчетном определении коэффициентов в уравнениях, отражающих степень изменения «циркулирующего» состава МСХ от «заправленного». Использование предлагаемого алгоритма позволяет выполнить корректировку «заправляемого» состава МСХ меньшим количеством итераций за счет близкого первого приближения «скорректированного заправляемого» состава МСХ (состава, полученного при корректировке значений «заправляемого» состава МСХ в ходе проведения экспериментальных исследований новых ДНХМ с учетом их конструктивных особенностей). Мольные концентрации первого приближения «скорректированного заправляемого» состава МСХ

определяются по экспериментально полученным зависимостям на основе расчета критериев подобия компонентов МСХ.

В завершении гл. 2 в качестве примера реализации предлагаемых методов приводятся результаты расчёта цикла ДНХМ и «заправляемого» состава каждого компонента МСХ. Относительная погрешность расчета «заправляемого» состава не превысила 5%.

Третья глава посвящена экспериментальным исследованиям ДНХМ на МСХ. Экспериментальный стенд создан на базе ДНХМ, разработанной для низкотемпературного оборудования, обеспечивающего криоконсервацию медико-биологических объектов при температуре -150°C – Рисунок 3.

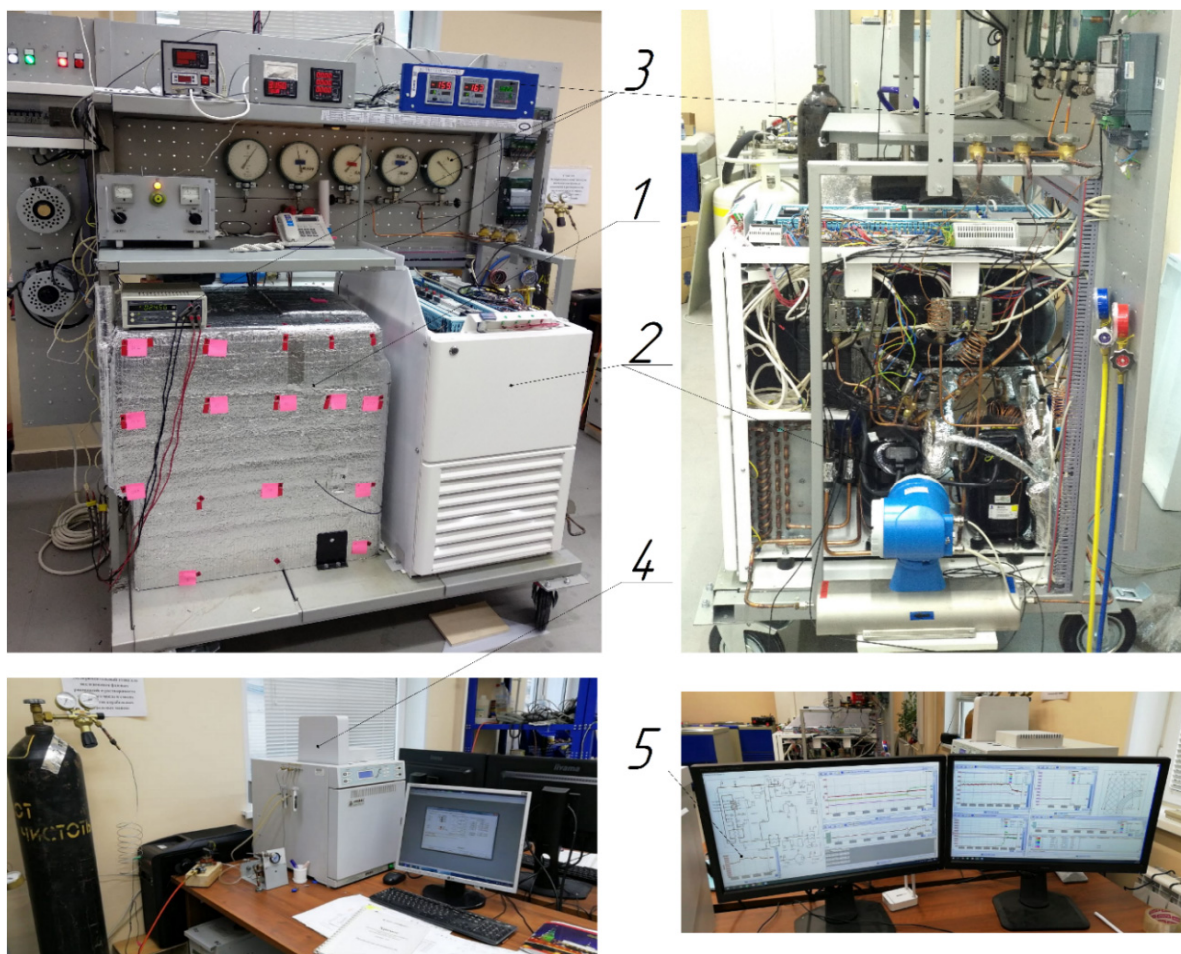


Рисунок 3. Внешний вид экспериментального стенда

Стенд состоит из экспериментального блока, включающего теплоизолированный корпус (поз. 1) и каскадную ДНХМ (поз. 2), реализованную по схеме на рисунке 1, контрольно-измерительной аппаратуры (поз. 3), комплекса для проведения хроматографических анализов проб МСХ (поз. 4) и сбора экспериментальных данных (поз. 5). В теплоизолированном корпусе размещены рекуперативный теплообменный аппарат и испаритель, представляющий из себя трубчатый медный теплообменный аппарат с ленточным электронагревателем для подвода дополнительной тепловой нагрузки. Стенд позволяет проводить

экспериментальные исследования ДНХМ на МСХ и измерения величин в диапазонах давлений до 40 бар, температур до -170°C , массовых расходов МСХ до 45 кг/ч, холодопроизводительности до 330 Вт.

Экспериментальные исследования были разделены на два этапа. На первом этапе определялись величины, характеризующие экспериментальный стенд и необходимые для обработки дальнейших результатов экспериментов, а также проводились предварительные испытания (п.3.3.1.). На втором этапе проводились непосредственно экспериментальные исследования ДНХМ на МСХ, включающие в себя определение коэффициентов, отражающих изменение «циркулирующего» состава МСХ по отношению к «заправленному» для МСХ заданного состава; определение влияния «заправляемого» состава рабочего тела на холодопроизводительность ДНХМ в стационарном режиме работы; апробацию технологического алгоритма обеспечения соответствия состава МСХ, «циркулирующего» на стационарном режиме работы ДНХМ, «расчетному циркулирующему» составу (п.3.3.2. - 3.3.5.).

Для определения функциональных зависимостей между мольными концентрациями «заправленного» и «циркулирующего» на стационарном режиме составов МСХ был сформирован ряд пятикомпонентных азот-углеводородных смесей (R728 / R50 / R170 / R290 / R600a) с различным суммарным «заправляемым» составом (X_i). В ходе экспериментов обеспечивались идентичными температура и давление на всасывании в компрессор нижнего контура ДНХМ (T_1 , P_1), суммарный «заправляемый» состав МСХ, геометрические размеры рабочего контура ДНХМ и температура на выходе из испарителя ДНХМ (T_9). Варьируемыми параметрами на стационарном режиме являлись «заправляемый» состав компонентов МСХ и тепловая нагрузка на испаритель ДНХМ. На Рисунке 4 приведена зависимость «циркулирующего» состава от «заправленного» для каждого компонента МСХ суммарным «заправляемым» составом 13,0 моль.

Как видно из рисунка 4, концентрации низкокипящих компонентов (R728 и R50) в «циркулирующем» составе выше, чем в «заправленном». Обратная тенденция наблюдается для высококипящих компонентов (R170, R290 и R600a). Относительное изменение мольных концентраций R728 для различных составов МСХ составило в среднем 17...18%, R50 – 8...9%, R170 – 7...8%, R290 – 5...12%, R600a – 4...17%. Полученные результаты для разной суммарной величины заправки незначительно отличаются друг от друга для низкокипящих компонентов, но более существенно (10-13%) для высококипящих. Это связано с различным исходным количеством «заправленного» состава высококипящих компонентов в рабочем контуре.

Установлено, что зависимости значений «заправляемых» составов МСХ (x) с циркулирующими составами МСХ (z) на установившемся режиме работы в определенном диапазоне массовых концентраций компонентов аппроксимируются линейными функциями с достаточно высокими величинами достоверности аппроксимации по компонентам – Таблица 1.

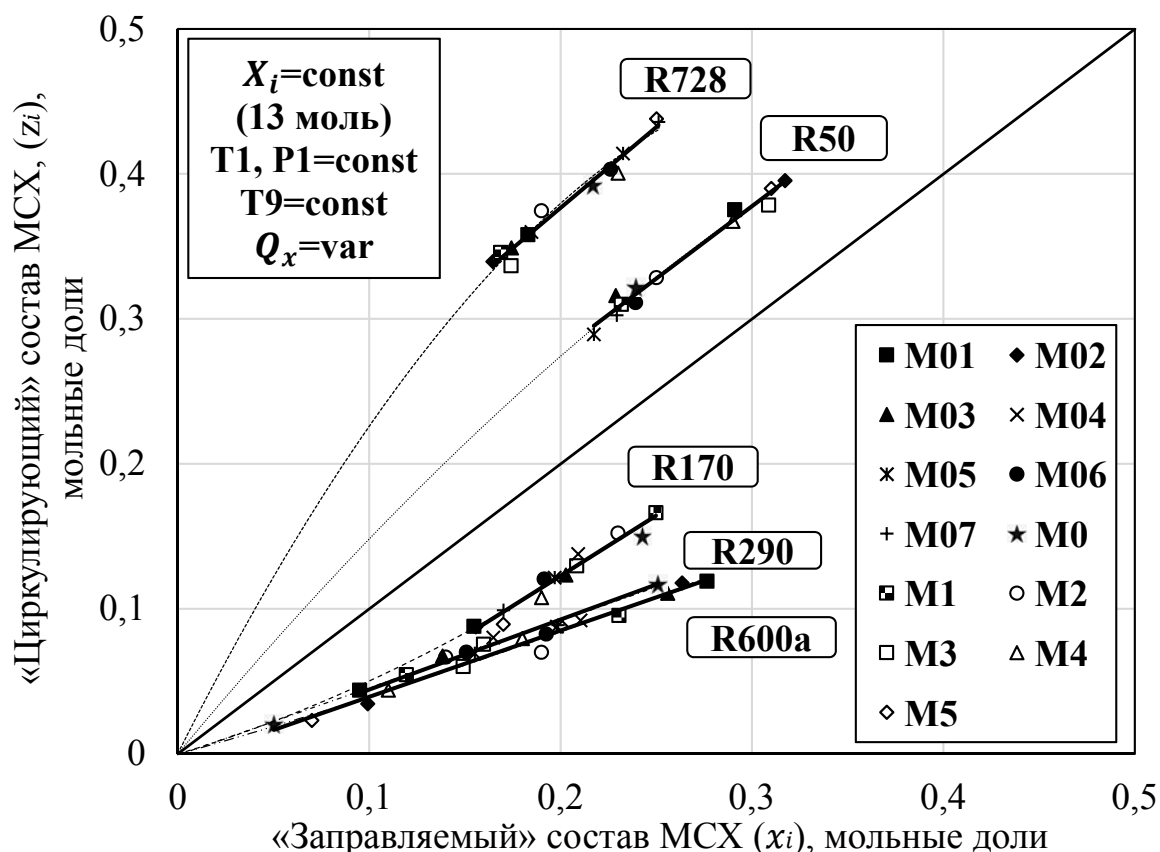


Рисунок 4. Зависимости изменения «циркулирующего» состава от «заправленного» по компонентам МСХ для суммарной заправки 13,0 моль

Таблица 1.

Соотношения между «заправляемыми» и «циркулирующими» на стационарном режиме составами исследуемых МСХ по компонентам

Компонент МСХ (диапазон x_i , мол.%; диапазон z_i , мол.%)	Эмпирическое уравнение аппроксимирующей функции	Величина достоверности аппроксимации R^2
суммарный «заправляемый» состав 13 моль		
R728 (16,5-25,1; 33,7-43,8)	$x = 0,8986 \cdot z - 0,1385$	0,97
R50 (21,7-31,7; 28,9-39,5)	$x = 1,0011 \cdot z - 0,0783$	0,98
R170 (15,5-25,0; 8,8-16,6)	$x = 1,2034 \cdot z + 0,0522$	0,96
R290 (9,5-25,1; 3,5-11,7)	$x = 2,0708 \cdot z + 0,0081$	0,96
R600a (5,0-27,6; 2,0-11,9)	$x = 2,1867 \cdot z + 0,0140$	0,98

На Рисунке 5 в качестве примера приведены экспериментальные полиномиальные зависимости для коэффициентов A_i от критериев подобию, которые характеризуют отличие «заправляемого» и «циркулирующего» состава МСХ в исследуемых диапазонах концентраций компонентов. Полученные результаты приведены на рисунке 5 в сравнении с результатами исследователей M.Q. Gong, N. L. Narasimhan и B. Sreenivas для аналогичных ДНХМ на МСХ, работающих по автокаскадному циклу или циклу Линде-Хемпсона в режимах «LRS» и «GRS». При этом в них применяется схожий перечень основных аппаратов, механизмов и машин.

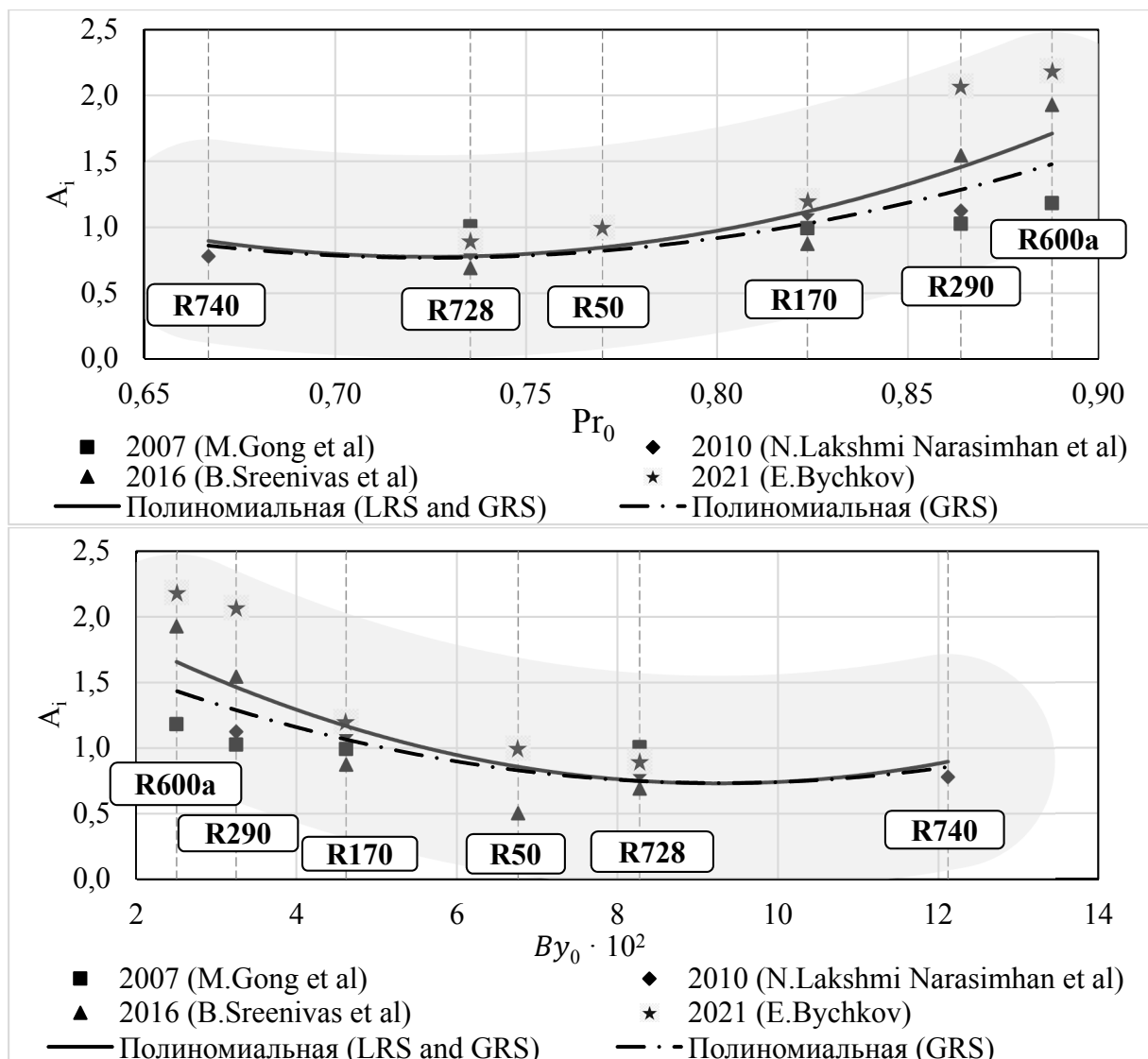


Рисунок 5. Экспериментальные зависимости коэффициентов A_i и B_i от критериев подобия $Pr_0 = \left(\frac{\mu_{cp}}{\lambda}\right)_0$ и $By_0 = \left(\frac{P_{кр}}{T_{кр}\rho_{кр}}\right)\frac{1}{c_{p_0}}$ компонентов МСХ

Для определения степени детерминированности изменения целевых функций: $Q_x/V_{нк}$ (удельной к теоретическому описанному объёму компрессора холодопроизводительности), ε_x (холодильного коэффициента), q_x (удельной массовой холодопроизводительности) и η_T (степени термодинамического совершенства), независимыми переменными - концентрациями ξ_i «циркулирующего» на стационарном режиме состава МСХ был проведен регрессионный анализ экспериментальных данных с применением 12 моделей различного типа в разработанной компьютерной программе. В результате проведенного анализа наилучшие результаты были получены для квадратичных моделей (среднеквадратичная относительная погрешность в принятом диапазоне концентраций ξ_i «циркулирующего» на стационарном режиме составе МСХ менее 12,6%). Ниже представлено уравнение квадратичной модели для $q_x = f(\xi_i)$ (8). Для определения абсолютных максимумов значений целевых функций $Q_x/V_{нк}$, ε_x , q_x и η_T , полученных в результате регрессионного анализа экспериментальных

данных, была проведена оптимизация этих целевых функций по методу обобщенного понижающего градиента.

$$q_x = -3,16 \cdot 10^2 + 4,53 \cdot \xi_{R728} + 13,0 \cdot \xi_{R50} + 0,687 \cdot \xi_{R170} - 7,69 \cdot \xi_{R290} + 3,12 \cdot \xi_{R600a} - 4,77 \cdot 10^{-2} \cdot \xi_{R728}^2 - 0,172 \cdot \xi_{R50}^2 - 7,90 \cdot 10^{-4} \cdot \xi_{R170}^2 + 0,459 \cdot \xi_{R290}^2 - 0,244 \cdot \xi_{R600a}^2 \quad (8)$$

Анализ полученных значений для целевых функций $Q_x/V_{\text{нк}}$, ε_x , q_x и η_t показал отличающиеся, но близкие значения оптимальных мольных концентраций компонентов МСХ по всем целевым функциям. В целом, максимум целевых функций, которому соответствует максимум холодильного коэффициента (5,3%), получен для состава МСХ R728 / R50 / R170 / R290 / R600a: 39,32% / 35,39% / 16,6% / 3,5% / 5,19% (мол.).

В п. 3.3.4. проведена апробация предлагаемого технологического алгоритма обеспечения «расчетного циркулирующего» состава МСХ на стационарном режиме ДНХМ. В результате на итерации $j = 3$ величины расхождения мольных концентраций по компонентам МСХ составили менее 5% и желаемый «расчётный циркулирующий» состав МСХ на стационарном режиме получен, что достаточно для экспериментального этапа проектирования новых ДНХМ.

Расхождение расчетных и экспериментально полученных значений удельной холодопроизводительности $Q_x/V_{\text{нк}}$ и q_x на стационарном режиме работы ДНХМ не превысили 11 %. Проведённое сопоставление позволяет сделать вывод, что разработанный метод и алгоритм могут быть использованы в практических целях для расчетной оценки «заправляемого» состава МСХ для сокращения объема работ при создании новых ДНХМ.

В четвёртой главе изложено практическое приложение по апробации предлагаемых методики расчета и технологического алгоритма, краткое описание и технические характеристики созданных опытно-промышленных образцов низкотемпературного оборудования с ДНХМ на МСХ. В п. 4.3. сформулированы рекомендации по комплексному проектированию низкотемпературного оборудования на базе ДНХМ на МСХ, основанные на разработанных методах и алгоритмах по итогам проведенной работы.

Отмечается, что благодаря корректировке «заправляемого» состава МСХ, удалось увеличить средний ресурс работы медицинского морозильника на ≈ 1 год при среднем ресурсе 8 лет, т.е. на 12,5%, за счет уменьшения коэффициента рабочего времени на $\approx 10\%$. Кроме того, применение методики теоретического определения «заправляемого» состава МСХ позволило значительно снизить временные и, как следствие, экономические затраты на проведение его пуско-наладочных работ.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Предложена усовершенствованная схема ДНХМ на МСХ для термостатирования объектов при температурах до -160°C , система её

управления и алгоритм работы, обеспечивающая расчетные параметры МСХ во всех процессах рабочего цикла ДНХМ при поддержании допустимых температурных условий работы электродвигателя серийно-выпускаемых компрессоров.

2. Разработана методика расчетного определения «заправляемого» количественного состава расслаивающейся МСХ в ДНХМ с относительной погрешностью расчета «заправляемого» состава каждого компонента МСХ не более 5% и новый технологический алгоритм обеспечения соответствия состава МСХ, «циркулирующего» на стационарном режиме работы ДНХМ, «расчетному циркулирующему» составу, позволяющий проводить корректировку «циркулирующего» состава МСХ за 3-4 итерации с точностью соответствия до 5% по компонентам МСХ.

3. Создан экспериментальный стенд для апробации расчетной модели ДНХМ на МСХ по предложенной схеме, позволяющий проводить экспериментальные исследования в диапазонах давлений до 40 бар, температур до -170°C , массовых расходов МСХ до 45 кг/ч, холодопроизводительности до 330 Вт.

4. По результатам проведенной серии экспериментальных исследований при различных соотношениях мольных долей компонентов модельной МСХ качественного состава R728 (16,5-25,1%) / R50 (21,7-31,7%) / R170 (15,5-25,0%) / R290 (9,5-25,1%) / R600a (5,0-27,6%) определены коэффициенты в уравнениях для каждого компонента, отражающие степень изменения «циркулирующего» состава МСХ от «заправленного» (табл. 1).

5. На основе полученных в ходе экспериментальных исследований данных разработаны квадратичные регрессионные модели целевых функций $Q_x/V_{\text{нк}}$, ε_x , q_x и $\eta_{\text{т}}$, определяющие зависимость удельной холодопроизводительности ДНХМ и показателей её эффективности от концентраций «циркулирующего» на стационарном режиме состава МСХ с среднеквадратичной относительной погрешностью в принятом диапазоне концентраций не более 12,6%. Полученные модели могут быть использованы при разработке ДНХМ малой производительности, работающих по схожим схемам циклов на аналогичных МСХ.

6. Определены оптимальные значения параметров ДНХМ на пятикомпонентной МСХ, в том числе мольный состав R728 (37,7%) / R50 (37,0%) / R170 (15,8%) / R290 (3,6%) / R600a (5,4%) и величина «заправляемого» состава МСХ – 12,5 моль, соответствующие максимальной экспериментально полученной величине холодопроизводительности – 69,8 Вт при температуре -150°C на выходе из испарителя ДНХМ.

7. На основании полученных результатов созданы опытно-промышленные образцы низкотемпературного оборудования с ДНХМ на МСХ, применяемые в медицине и машиностроении для термостатирования на температурных уровнях от -90 до -160°C , и разработаны рекомендации по комплексному проектированию низкотемпературного оборудования с ДНХМ на МСХ для решения широкого круга задач.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Bychkov E. G. An analytical method for ensuring the optimal circulating composition of the multicomponent refrigerant mixture in a steady-state operation mode of the Joule-Thomson refrigerator operating with mixtures // International Journal of Refrigeration. 2021. №130. P. 356-369. (1,62 п.л./1,47 п.л.)
2. Каскадная холодильная машина с системой термостабилизации компрессора. Патент РФ на изобретение № RU2743653 / Е. Г. Бычков, В.И Яковлев, Б.А. Макаров, В.Л. Уманский, А.А. Ковалёв заявл.21.05.20; опубл.20.02.21. Бюлл.№5.
3. The Calculation of Thermodynamic Properties of Multicomponent Refrigerant Blends—Working Fluids of Throttling Low-Temperature Refrigeration Machines / Bychkov E. G. [et al.] // Chemical and Petroleum Engineering. 2020. V.55. №. 12. P. 20–24. (1,16 п.л./0,47 п.л.)
4. Comparative Analysis of Equations of State for Calculating the Thermodynamic Properties of a Vapor-Liquid Multicomponent Refrigerant Blend Comprising the Working Fluid of a Low-Temperature Throttling Refrigeration Unit / Bychkov E. G. [et al.] // Chemical and Petroleum Engineering. 2020. V. 56. №. 5. P. 35-39. (1,16 п.л./0,44 п.л.)
5. Bychkov E. G., Makarov B.A., Zherdev A.A. Development of a method of determining the component composition of the working fluid of low-temperature throttling refrigeration machines operating with multicomponent mixtures of coolants // Chemical and Petroleum Engineering. 2019. V. 54. № 10. P. 33-37. (1,04 п.л./0,42 п.л.)
6. Experimental study of method for charge composition determining for Joule-Thomson multicomponent mixed-refrigerant refrigerator / Bychkov E. G. [et al.] // Proceedings of the 25th IIR International Congress of Refrigeration, ICR 2019, Montreal, Canada. 2019. P. 1182-1189. (0,92 п.л./0,65 п.л.)
7. Experimental research of low-temperature throttling refrigerator for cryoconservation of medical and biological objects / Bychkov E. G. [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. 2017. V. 891, № 1, №012109.
8. Разработка и исследование холодильных машин малой производительности на многокомпонентных смесях хладагентов для решения задач криостатирования на температурном уровне 180..120K / Е.Г. Бычков [и др.] // Проблемы развития корабельного вооружения и судового радиоэлектронного оборудования. 2017. Т. 1. № 1-1. С. 49-54. (0,69 п.л./0,31 п.л.)
9. Результаты теоретических и экспериментальных исследований холодильной машины ультранизкотемпературного медицинского морозильника для обеспечения криоконсервации и длительного хранения медико-биологических объектов / Е.Г. Бычков [и др.] // Проблемы развития корабельного вооружения и судового радиоэлектронного оборудования. 2016. Т. 1. № 3-8. С. 51-59. (1,04 п.л./0,50 п.л.)