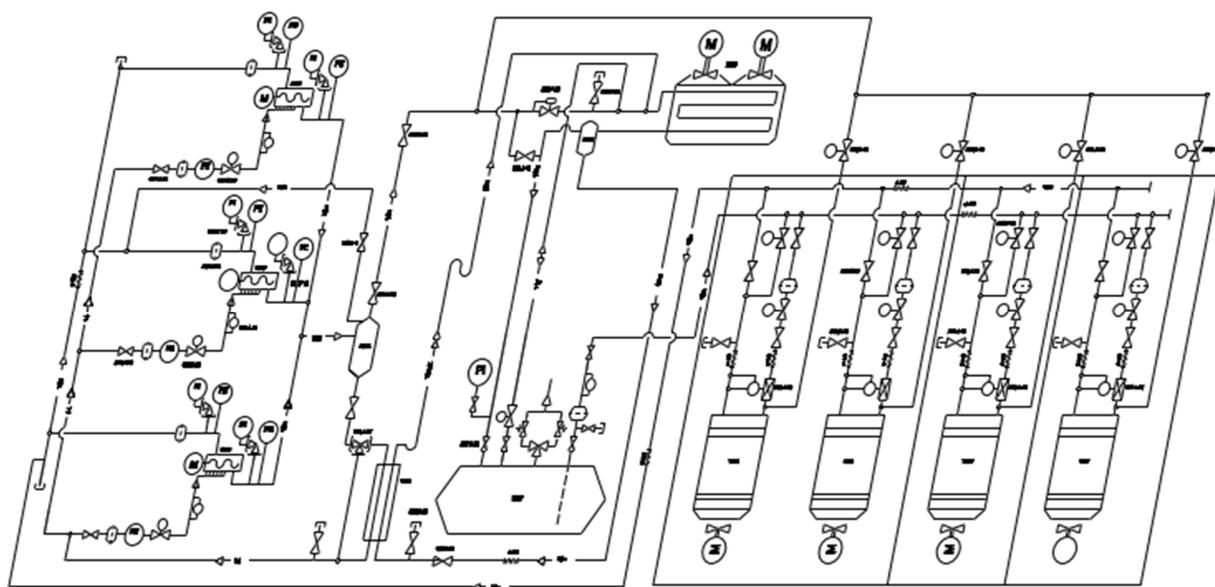


Е.Т. Петров, А.А. Круглов

**КОМПЬЮТЕРНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ
НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СИСТЕМ**



**Санкт-Петербург
2021**

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Е.Т. Петров, А.А. Круглов
КОМПЬЮТЕРНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ
НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СИСТЕМ

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

РЕКОМЕНДОВАНО К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ В УНИВЕРСИТЕТЕ ИТМО
по направлению подготовки 16.04.03 Холодильная, криогенная техника
и системы жизнеобеспечения
в качестве учебно-методического пособия для реализации основных
профессиональных образовательных программ высшего образования
магистратуры

 УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Санкт-Петербург
2021

Петров Е.Т., Круглов А.А. Компьютерное проектирование
низкотемпературных систем. – СПб: Университет ИТМО, 2021. – 122 с.

Рецензент:

Бараненко Александр Владимирович, доктор технических наук, профессор,
советник при ректорате Университета ИТМО.

Приведены основные разделы курса «Компьютерное проектирование
низкотемпературных систем», изложены основы методов математического
моделирования и структурно-параметрической оптимизации систем,
приведены методы расчета холодильных циклов, оборудования и
трубопроводов с использованием программных продуктов различных фирм,
приведены методические указания по изучению дисциплины. Пособие
может быть полезно для аспирантов и специалистов, изучающих
низкотемпературную технику.



Университет ИТМО – ведущий вуз России в области информационных
и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших
в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013
года Университет ИТМО – участник программы повышения
конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых
научно-образовательных центров, известной как проект «5 в 100». Цель
Университета ИТМО – становление исследовательского университета
мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на
интернационализацию всех направлений деятельности.

© Университет ИТМО, 2021
© Петров Е.Т., Круглов А.А., 2021

Содержание

ВВЕДЕНИЕ	4
1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ПРОЕКТИРОВАНИИ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ ХОЛОДОСНАБЖЕНИЯ	6
2 СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ СИСТЕМ ХОЛОДОСНАБЖЕНИЯ	18
3 ОСОБЕННОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМ	24
4 СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМ ХОЛОДОСНАБЖЕНИЯ	47
5 ПРАКТИЧЕСКИЕ ПРИМЕРЫ РАСЧЕТОВ И ПОДБОРА ОТДЕЛЬНЫХ ВИДОВ ХОЛОДИЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ И ТРУБОПРОВОДОВ ..	67
6 МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ИЗУЧЕНИЮ КУРСА "КОМПЬЮТЕРНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СИСТЕМ"	97
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	111
ПРИЛОЖЕНИЕ А1	115
ПРИЛОЖЕНИЕ А2	117
ПРИЛОЖЕНИЕ А3	118
ПРИЛОЖЕНИЕ А4	122

ВВЕДЕНИЕ

Научно-технический прогресс в последние десятилетия в значительной степени определяется уровнем использования электронно-вычислительных машин (ЭВМ) во всех областях техники и народного хозяйства.

Современные проблемы, которые возникают перед наукой и техникой, вызывают необходимость решать все более сложные задачи, связанные с проектированием разных объектов в сжатые сроки. Это оказывается возможным только с использованием методов и средств компьютерного проектирования, формированием систем автоматизированного проектирования (САПР).

Цель компьютерного проектирования – обеспечить высокий уровень эффективности проектируемых объектов (в том числе и систем холодоснабжения), повысить уровень автоматизации, сократить сроки проектирования. В связи с этим появляются новые требования к инженерно-техническому персоналу, который участвует в реализации таких объектов с использованием существующих средств технического, математического и программного обеспечения.

При этом существенно меняются функции специалистов-проектировщиков в процессе автоматизированного проектирования и конструирования систем холодоснабжения, отдельных блоков и подсистем. И все большее значение приобретает уровень подготовки специалистов-холодильщиков по курсу «Компьютерное проектирование низкотемпературных систем».

Предметом указанного курса являются теоретические основы оптимального проектирования систем холодоснабжения, методическое, математическое и программное обеспечение при реализации задач компьютерного проектирования.

Целью курса является повышение уровня подготовки магистров, обучение их методам расчета и подбора холодильного оборудования, методам оптимального проектирования холодильных установок с использованием современных средств САПР.

Необходимыми условиями для освоения дисциплины являются: знание математики, вычислительной техники, термодинамики, гидромеханики, холодильной техники, владения навыками работы с ПК.

Пособие предназначено для бакалавров и магистров, специалистов в области холодильной техники.

В главе 1 рассматриваются общие сведения о проектировании различных холодильных систем, приводятся основные представления о системах автоматизированного проектирования (САПР), видах обеспечения САПР.

В главе 2 анализируются особенности компьютерного проектирования на основе математического моделирования с использованием системного подхода.

В главе 3 рассматриваются особенности математического моделирования систем холодоснабжения.

В главе 4 рассматриваются методы структурно-параметрической оптимизации систем холодоснабжения.

В главе 5 приведены практические примеры расчета и подбора оборудования холодильных систем с использованием программного обеспечения ведущих зарубежных фирм.

В главе 6 приведены методические указания по изучению курса.

В Приложении приведены задания по расчету гидравлических контуров.

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ПРОЕКТИРОВАНИИ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ ХОЛОДОСНАБЖЕНИЯ

В начале курса «Компьютерное проектирование низкотемпературных систем» следует ознакомиться с основными терминологическими особенностями, определениями понятий «проект» и «проектирование».

Проект – сфера деятельности, направленная на изменение какой-либо системы в соответствии с поставленными целями.

В сложившейся практике строительства предприятий понятие «проект» включает в себя:

- проведение предпроектных исследований (стадия ПП, ТЭО);
- формирование бизнес-плана;
- получение разрешений на инженерно-изыскательные работы, их проведение, составление соответствующей документации;
- разработка задания на проектирование и его согласование;
- разработка проектной документации стадии «П» и ее согласование в заинтересованных организациях и ведомствах;
- проведение государственной экспертизы проекта;
- разработка рабочей документации (стадии «Р»);
- получение разрешения на новое строительство;
- монтаж, наладка, испытания (включая авторский надзор);
- ввод объекта в эксплуатацию;
- подготовка специалистов для эксплуатации объекта;
- эксплуатация, техническое обслуживание;
- расширение и развитие производства;
- демонтаж, утилизация, продажа.

Проектирование – процесс создания описания, необходимого для построения в заданных условиях ещё не существующего объекта. В результате проектирования формируется последовательность процессов принятия решений, приводящая к построению объекта с заданной степенью детализации, удовлетворяющего всем поставленным требованиям при полученных технико-экономических показателях.

Алгоритм проектирования – совокупность предписаний, необходимых для выполнения процесса проектирования.

Технология проектирования – последовательность действий или операций, позволяющих выполнить процесс проектирования объекта согласно техническому заданию.

Проектирование любой системы представляет собой комплексный процесс, включающий следующие виды проектной и конструкторской деятельности:

- инженерно-технические расчеты;
- чертежно-графические работы;

- поиск различной информации (исходных данных, каталогов и т.д.);
- принятие проектных конструкторских решений и т.д.

Процесс автоматизированного проектирования ведется в рамках определенной организационной структуры (САПР) и требует различных режимов взаимодействия проектировщиков и ЭВМ.

Общее управление проектом холодильной системы обычно осуществляет руководитель проекта, назначенный руководителем фирмы-подрядчика. Для формирования проектной и рабочей документации назначается генеральная проектная организация после проведения тендера, руководством проектной организации назначается главный инженер проекта.

В процессе выбора проектной организации учитывается ее опыт в реализации оптимизационных предпроектных и проектных исследований с использованием компьютерного проектирования систем холодоснабжения.

Формирование проектной документации осуществляется с учетом требований нормативной документации, стандартов, сводов правил и инструкций:

- Постановление № 87 от 16.02.2008 г. О составе разделов проектной документации и требованиях к их содержанию.

- ГОСТ Р 21.101-2020. Система проектной документации для строительства. Основные требования к проектной и рабочей документации.

- ПБ 03-592-03. Правила устройства и безопасной эксплуатации холодильных систем.

- ГОСТ EN 378-1(2, 3, 4)-2014. Системы холодильные и тепловые насосы. Требования безопасности и охраны окружающей среды.

- Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности "Правила безопасности аммиачных холодильных установок и систем".

- СП 109.13330.2012. Холодильники. Актуализированная редакция СНиП 2.11.02-87.

Реализация проектных работ возможна только ответственными специалистами согласно требований профессионального стандарта и Роспотребнадзора. Система нормативной документации формирует ограничения на параметры проекта крупной системы холодоснабжения с целью обеспечения требований технический, экономический и технологической безопасности.

В состав проектной документации входит обычно целый ряд разделов, дающих полное представление об объекте:

1. Генеральный план.
2. Архитектурно-строительные решения.
3. Конструкции металлические и железобетонные (КМ и КЖ).
4. Технологические решения.
5. Инженерные сети:

- 5.1. Система холодоснабжения.
- 5.2. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха.
- 5.3. Водоснабжения, водоотведение.
- 5.4. Электроснабжение.
- 5.5. Освещение.
6. Автоматизация.
7. Мероприятия по охране окружающей среды.
8. Техника безопасности.
9. Мероприятие по повышению энергетической эффективности систем.
10. Задание смежникам.
11. Задание на проектирование.

Состав и требования к проектной документации при строительстве стандартных систем холодоснабжения оговорены в ГОСТ Р 21.101-2020 СПДС. Основные требования к проектной и рабочей документации, где также приводятся нормативные ссылки на основные стандарты СПДС и ЕСКД.

В процессе проектирования систем холодоснабжения формируется последовательность принятия решений и действий, приводящая к построению объекта, удовлетворяющего всем требованиям нормативных документов. Используется как одностадийное, так и двухстадийное проектирование. Алгоритм двухстадийного проектирования содержит следующие этапы:

- Разработка и согласование задания на проектирование системы холодоснабжения;
- Контроль и анализ исходной информации;
- Реализация проекта на стадии "П";
- Выпуск проектной и сметной документации;
- Экспертиза проектной документации, согласование;
- Реализация проекта на стадии "Р";
- Выпуск рабочей документации.

Блок-схема алгоритма реализации проекта на стадии "П" представлена на рисунке 1.1.

Проектирование малотоннажных холодильных камер, рефрижераторных контейнеров и других транспортно-технологических холодильных и рефрижераторных машин единичного изготовления также может выполняться исходя из требований СПДС с использованием унифицированного или серийного оборудования различных фирм.

Проектирование изделий серийного изготовления требует выпуска конструкторской документации согласно ЕСКД, в этом случае процесс проектирования значительно усложняется.



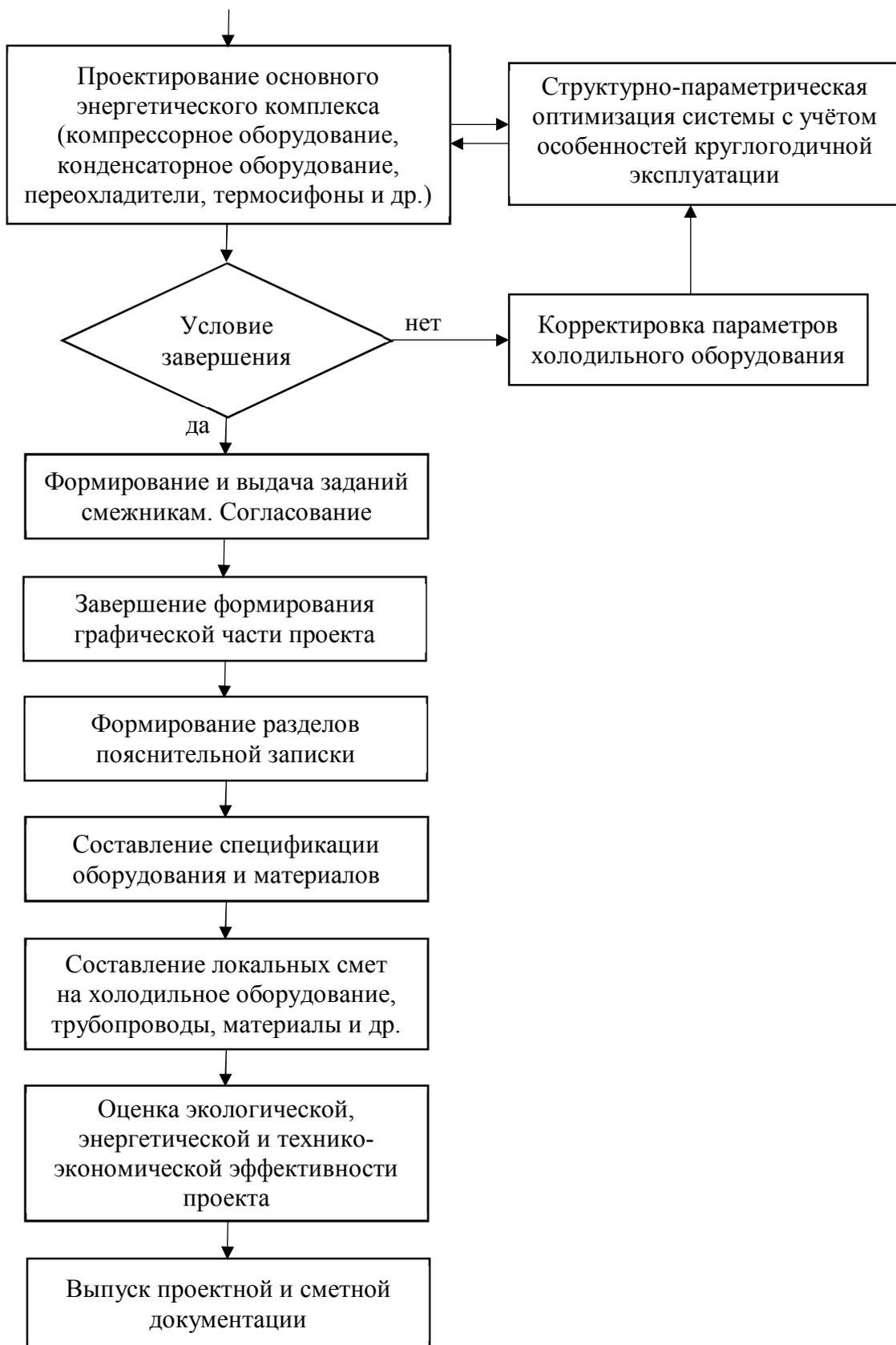


Рисунок 1.1 – Алгоритм процесса проектирования на стадии "П"

Проектирование при этом охватывает весь комплекс работ, начиная с поиска принципиальных схем холодильных установок и технических решений по установке контейнеров, увязки параметров, включает проведение экспериментальных исследований опытных образцов, полную разработку конструкции изделия и выпуск окончательной технической документации, необходимой для организации серийного производства изделия, определенного техническим заданием.

В соответствии с межгосударственными стандартами весь процесс проектирования делится на следующие стадии разработки:

Техническое задание (ТЗ).

Техническое предложение (ТП).

Эскизный проект (Э).

Технический проект (Т).

Разработки рабочей документации:

– для опытного образца;

– для серийного производства.

Перечень конструкторской документации, наименование и т.д. также оговорены национальными стандартами РФ и ГОСТ 2.102-2013 (ЕСКД). «Виды и комплектность конструкторских документов».

Техническое задание (ТЗ) устанавливает:

– основное назначение изделия;

– технические характеристики, показатели качества;

– технико-экономические требования.

Техническое предложение (ТП) представляет собой совокупность конструкторских документов, которые должны содержать технические и технико-экономические обоснования целесообразности разработки документации на новое изделие (рефрижераторный контейнер или другую транспортно-технологическую машину) с учетом характеристик существующих изделий и патентных материалов.

При разработке ТП осуществляется:

– выбор основных параметров изделия и их обоснование;

– выбор конструктивной схемы, обоснование основных размеров;

– проведение предварительных теплотехнических и гидравлических расчетов;

– предварительная разработка чертежей общего вида, габаритных чертежей, схем;

– технологическая и экономическая оценка изделия по укрупненным показателям;

– составление пояснительной записки и ведомости технического предложения.

Согласованное с заказчиком и утвержденное ТП является основанием для разработки эскизного проекта (Э).

В эскизном проекте приводятся принципиальные конструктивные решения, дающие общее представление об устройстве и принципе работы изделия, назначении, основных параметрах и габаритных размерах.

Формирование эскизного проекта состоит из трех этапов:

1) разработка эскизного проекта конструкции изделия (рефрижераторного контейнера, холодильно-технологической установки и системы управления);

2) изготовление изделия (рефрижераторного контейнера, холодильно-технологической установки), проведение теплотехнических испытаний;

3) рассмотрение и утверждение эскизного проекта.

Эскизный проект содержит материалы полной разработки конструкции изделия, уточняются характеристики, основные размеры, проводятся прочностные расчеты.

В ходе эскизного проектирования осуществляется поиск оптимального решения задачи, поставленной в техническом задании, составляется комплекс конструкторских документов.

Утвержденный эскизный проект является основой для разработки технического проекта.

Технический проект – это совокупность конструкторских документов, которые представляют собой окончательные технические решения, дающие полное представление об изделии, содержит исходные данные для разработки конструкторской документации.

При выполнении технического проекта изделия проводятся:

– все виды расчетов (тепловые, гидравлические, газодинамические, прочностные и другие) с целью уточнения принятых параметров, размеров, форм, оценки их работоспособности и подлинности;

– обработка результатов стендовых испытаний во всем диапазоне режимов работы;

– окончательная отработка чертежей (общих видов, габаритных, отдельных деталей и узлов);

– разработка перспективной технологии изготовления в процессе серийного производства;

– экономическая оценка стоимости изготовления при различных масштабах производства;

– составление ведомости технического проекта.

Законченный технический проект после утверждения переходит в стадию «Разработка рабочей документации», где формируется весь комплект документации, включая пояснительную записку, чертежи, технические условия на производство, сборку и испытания, спецификации деталей, материалов и др.

Применение компьютерного проектирования оказывает значительное влияние на содержание отдельных этапов и весь график проектирования. Появляется возможность использования современных программных

продуктов, более совершенных методик расчетов, проведения тщательных оптимизационных исследований. Возможен перевод целого ряда экспериментальных работ на оптимальное теоретическое исследование.

Эффективность инвестиционных вложений определяется в значительной степени сроками ввода объекта в эксплуатацию, что вызывает необходимость проектирования предприятий или изделий в сжатые сроки. Удовлетворить противоречие требований повышения качества и сокращения сроков проектирования оказывается возможным только при использовании компьютерного проектирования и современных программных комплексов.

Силами ведущих зарубежных и отечественных организаций и фирм разрабатываются новые программные средства, программные комплексы и технологии проектирования для использования в системах автоматизированного проектирования (САПР) предприятий. Значительное содействие при этом оказывают фирмы-поставщики оборудования, которые разрабатывают программные модели для расчета и подбора выпускаемого оборудования, указанные продукты широко используются в процессах проектирования практически всех ведущих проектных организаций.

САПР является одним из основных элементов в проектировании и строительстве новых и реконструкции действующих объектов, она формирует не только детальное описание (на стадиях ПП, П, Р) объекта, но и предопределяет методы ведения последующих этапов строительства объекта.

В итоге САПР обычно рассматривается как организационно-техническая система, состоящая из комплекса средств и технологий автоматизации проектирования, организационно взаимосвязанных подразделений проектных организаций, реализующих совместно процесс проектирования.

Комплекс состоит из совокупности средств математического, лингвистического, программного, информационного, методического и организационного обеспечения.

Техническое обеспечение – совокупность и взаимодействие технических средств, предназначенных для выполнения автоматизированного проектирования (принтеры, плоттеры, сканеры и ЭВМ, объединенные в комплексы автоматизированные рабочие места – АРМ). Средства вычислительной техники осуществляют ввод-вывод алгебраической, цифровой и графической информации, обработку, хранение и передачу выпускаемой документации.

Математическое обеспечение – совокупность математических методов, моделей и алгоритмов проектирования, представленных в заданной форме.

Лингвистическое обеспечение САПР – совокупность языков проектирования, включая термины и определения, правила формализации естественного языка, методы сжатия и развертывания текстов.

Программное обеспечение (ПО) – совокупность машинных программ, необходимых для систем обработки данных на машинных носителях, и программная документация, обеспечивающая эксплуатацию подсистем САПР. Оно состоит из трех основных частей: общесистемное, базовое, прикладное. Общесистемное обеспечение организует работу технических средств, базовое служит для обеспечения функционирования прикладных программ. Прикладное состоит из пакетов прикладных программ, каждый пакет предназначен для реализации определенного этапа проектирования.

Информационное обеспечение – совокупность сведений и документов, необходимых для выполнения автоматизированного проектирования. Компоненты:

- документы, содержащие описания стандартных проектных процедур);
- нормативно-справочные документы;
- системы классификации и кодирования информации;
- фонды алгоритмов и программ и т.д.

Основную часть информационного обеспечения представляют автоматизированные базы данных (БД) и система управления базой данных (СУБД).

Методическое обеспечение – это совокупность методических документов, устанавливающих состав проектной организации, связи и функции подразделений, инструкции, процесс проектирования.

Термин «компьютерное проектирование» появился в 80-е годы прошлого столетия, он рассматривается как процесс описания структуры объектов, внутренних и внешних процессов и условий функционирования проектируемых объектов. На первых этапах разработки средств компьютерного проектирования речь шла о реализации сложных инженерных расчетов, подборе отдельных видов оборудования и их оптимизации. При этом обычно использовалась концепция однопользовательского доступа к данным проекта на уровне файлов при изолированности этих данных от других типов данных.

В последующем начинают появляться современные системы компьютерного проектирования, базирующиеся на применении разных моделирующих программ. При этом стали использовать технологии, которые позволяют осуществлять параллельную работу над проектными данными на уровне компонентов с охватом всего цикла проектирования (от обработки геодезии и формирования технологических схем до получения трехмерных моделей объектов, включая автоматическую генерацию изометрических монтажных, сборочных и компоновочных чертежей, спецификации оборудования и сметной документации).

Очевидно, что в ходе реализации проекта необходима организация взаимодействия исполнителей, т. е. определенная система управления, которая должна обеспечить выполнение следующих функций:

- определить цели проекта и провести его обоснование;
- выявить структуру проекта;
- определить объемы и источники финансирования;
- подобрать исполнителей и заключить контракты;
- определить сроки выполнения проекта, составить график его реализации;
- рассчитать необходимые ресурсы;
- произвести калькуляцию и анализ затрат;
- планировать и учитывать риски;
- организовать реализацию проекта.

Методы управления проектированием промышленных предприятий и технической документацией разрабатываются практически всеми фирмами-разработчиками программного обеспечения. При этом обеспечиваются большие возможности для проектировщиков:

- улучшение качества проектирования и расчетов;
- автоматизация типовых задач;
- упрощение редактирования двумерных и трехмерных моделей;
- синтез схем технологического производства, холодоснабжения и др.;
- составление спецификации оборудования;
- автоматический выбор материалов и соединений.

Очевидно, что каждая из фирм-разработчиков старается постоянно обновлять своё программное обеспечение с учётом требований современного проектирования, повышения точности инженерных расчетов и эффективности производства.

Современные используемые программные и аппаратные средства должны обеспечить эффективную и безопасную работу пользователей – проектировщиков (сотрудников различных отделов проектной организации).

Наиболее известными среди специалистов-холодильщиков являются следующие фирмы-разработчики программного обеспечения:

- *Microsoft* (США);
- *Autodesk* (США);
- Аскон (Россия);
- *PTC* (США);
- *CADMATIC* (Финляндия) и др.

Фирма *Microsoft* [1] известна разработками операционных систем нового поколения (*Windows* различных версий и др.), офисных пакетов и новых информационных технологий.

Фирма *Autodesk* [2] известна разработками платформенной САПР, ставшей самой распространенной в мире, фундаментальными решениями для двух- и трехмерного моделирования, средств архитектурной визуализации (*AutoCAD* и серии решений на её базе). В последнее время сотрудниками фирмы внедряется технология информационного моделирования зданий (*BIM*), которая обеспечивает целостный подход к проектированию зданий благодаря виртуальному воспроизведению реального процесса строительства. Программные продукты *Autodesk* являются идеальным решением для пользователей, поскольку позволяют использовать опыт проектирования с возможностью использовать *2D*-разработки для создания *3D*-моделей, позволяют легко обмениваться с различными приложениями *Autodesk*.

Фирма Аскон [3] известна разработками в промышленно-строительном проектировании, система КОМПАС-3D и приложения к ней дают возможность легкого освоения *3D*-моделирования и выпуска документации в соответствии с ЕСКД и СПДС, что позволяет использовать в проектных и проектно-конструкторских работах в различных отраслях промышленности.

Фирма *PTC* [4] является разработчиком программного обеспечения для двумерного и трехмерного проектирования, а также широко известного пакета *Mathcad*, предназначенного для реализации вычислений и инженерных расчетов. Проект *Mathcad* – это сочетание мощной вычислительной программы, полнофункционального текстового процессора и богатого инструментария для построения графиков произвольного вида.

Фирма *Cadmatic* [5] является одной из ведущих разработчиков ПО по *3D*-проектированию промышленных предприятий и транспортных средств. Автоматизация типовых задач, управляемые спецификации, использование прогрессивных правил проектирования, прокладка трубопроводов (базирующаяся на понятиях трассы), автоматический выбор материалов и типов соединений являются положительными особенностями ПО. Особый интерес представляет возможность интеграции с *AutoCAD* и другими архитектурно-инженерными системами.

В настоящее время в области математического моделирования гидродинамики и теплообмена в камерах термической обработки и хранения продукции существует три наиболее известных и интенсивно развиваемых программных продукта мирового класса: *ANSYS CFX*, *ANSYS Fluent* и *Simcenter STAR-CCM+* (*Siemens Digital Industries Software*, ранее *STAR-CD* от *CD-Adapco Group*,) [6, 7, 8].

Указанные программы являются универсальными решениями, предназначенными для комплексного расчета аэрогидродинамических течений при наличии теплообмена, излучения, химических реакций в

многофазных системах самой сложной геометрии. Возможности программ практически полностью покрывают требования прикладных задач.

Пакет *Fluent* рассчитан на применение в рамках интегрированной *CAE* среды. Основным предназначением пакета является его использование в качестве инструмента исследований, проектирования, разработки и оптимизации для задач, связанных с течениями жидкостей и газов.

Компания-разработчик имеет теснейшие связи с рядом научно-исследовательских институтов и постоянно стремится к повышению быстродействия, эффективности и точности производимого ею программно-математического обеспечения, а также к расширению спектра доступных математических моделей и улучшению гибкости используемых алгоритмов.

Для решения основных уравнений термо- и аэрогидродинамики *Fluent* использует метод контрольного объема. Сначала выполняется трехмерное построение расчетной области и сетки, задаются типы граничных условий. Для дискретизации задачи используется метод конечных элементов. Для каждого элемента ставится задача выполнения всех законов сохранения (массы, импульса, энергии...). *Fluent* позволяет проводить расчеты на сетках, составленных из ячеек различных форм, элементарные ячейки могут быть тетраэдрами, пирамидами, клиньями и скошенными параллелепипедами. Сетку можно сгущать или разрезать в нужных областях с плавными переходами размера как во время генерации сетки, так и в процессе решения задачи. Например, можно сгустить сетку в области резких изменений температуры, положение которой получено в процессе решения. Затем определяются все физические модели и параметры и производится решение методом итераций.

Основным поставщиком ПО на рынке России является компания *Softline* (авторизованный партнер известных мировых производителей), которая занимает ведущие позиции в сфере дистрибуции программного обеспечения и консалтинга.

Softline IT Academy – академическая программа для вузов России и СНГ по обучению студентов *IT* (<http://www/it-academy.ru>), является партнером *Microsoft* по программе *Micrisoft IT Academy*.

Контрольные вопросы и задания

1. Опишите основные способы проектирования систем холодоснабжения.
2. Определите понятия "проект" и "проектирование".
3. Требования к формированию проектной документации. Состав проектной документации.
4. Стадийность проектирования. Алгоритм двухстадийного проектирования.

5. Особенности проектирования изделий серийного изготовления.
6. Стадии разработки изделий согласно ЕСКД.
7. Определение САПР. Виды обеспечения САПР.
8. Особенности и методы управления проектами.
9. Привести перечень ведущих фирм-разработчиков ПО для САПР.

2 СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ СИСТЕМ ХОЛОДОСНАБЖЕНИЯ

При создании и эксплуатации сложных систем холодоснабжения требуется обычно проводить многочисленные исследования и расчеты с:

– оценкой различных технических и технико-экономических показателей, характеризующих свойства как отдельных подсистем, так и системы в целом;

– выбором оптимальных структур отдельных подсистем и структуры всей системы;

– выбором оптимальных значений параметров системы.

Выполнение таких исследований возможно лишь при наличии методов математического моделирования с использованием системного подхода. При этом представляется, что система холодоснабжения состоит из множества взаимодействующих подсистем и элементов.

Основная цель системного подхода – выявить механизм функционирования системы холодоснабжения, а для управляющих систем – обеспечить адаптацию к изменяющимся условиям эксплуатации. Анализ показывает, что система холодоснабжения может служить объектом системного подхода. Задача оптимизации холодильных установок совпадает с целью системного подхода – обеспечить максимальную эффективность работы системы при переменных условиях эксплуатации.

Среди системных исследований особое место занимают вопросы описания строения системных объектов. Эти исследования опираются на ряд понятий, среди которых в первую очередь следует отметить понятие системы [9, 10].

Системой называют совокупность любым способом выделенных реальных или воображаемых элементов. Эта совокупность является системой, если:

а) заданы связи, существующие между этими элементами;

б) каждый из элементов внутри системы считается неделимым;

в) с окружающей средой система взаимодействует как целое;

г) при изменении во времени совокупность будет считаться одной системой, если между ее элементами в разные моменты времени можно провести однозначное соответствие.

Система рассматривается как целостное множество взаимосвязанных неделимых элементов. Однако такое деление системного объекта на части носит условный характер и изменяется в зависимости от принимаемого уровня систем. Любой элемент при определенных условиях может рассматриваться как система.

Системный подход базируется на рассмотрении холодильной установки во взаимосвязи с окружающими её подсистемами и объектами. При этом: заданы связи между отдельными элементами холодильной установки; каждый элемент считается неделимым; с окружающей средой система взаимодействует как целое, т.е. система рассматривается как целостное множество взаимосвязанных условно неделимых элементов. Наличие связей между отдельными элементами холодильной системы означает, что изменение параметров в любом из элементов вызывает изменение параметров в других элементах системы. Связи между отдельными элементами относятся к категориям внутренних связей, с помощью внешних связей осуществляется взаимодействие между холодильной установкой и окружающей средой. Система холодоснабжения в общем случае может рассматриваться как многоуровневая иерархическая структура (см. рисунок 2.1), которой присущи следующие свойства:

- вертикальная соподчиненность;
- приоритет действий подсистем верхнего уровня;
- взаимозависимость действий.

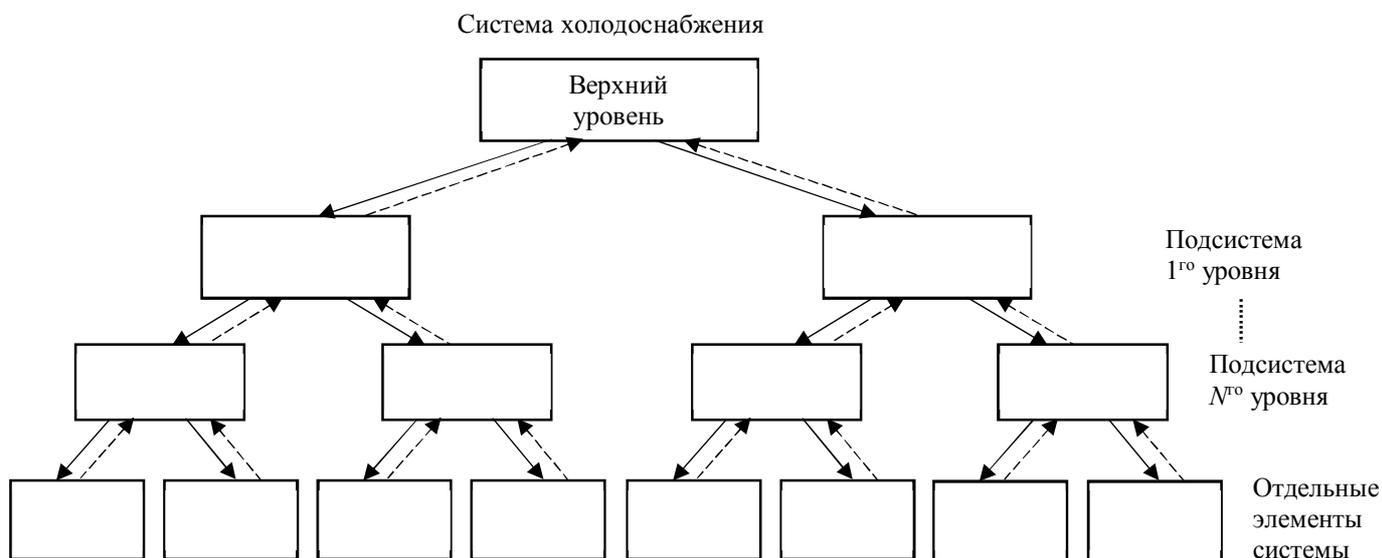


Рисунок 2.1 – Иерархическая структура произвольной системы
холодоснабжения

Вертикальная соподчиненность означает, что любая иерархия состоит из последовательного расположенных вертикально взаимодействующих подсистем, составляющих систему холодоснабжения. Приоритет действий подсистем верхнего уровня носит для нижерасположенных уровней обязательный характер.

Так как подсистема низшего уровня действует в направлении достижения собственных локальных целей, то между ними возникает конфликт, в результате которого глобальная цель системы может быть не достигнута. Поэтому задача координирующих действий [11] состоит в ликвидации такого конфликта. Очевидно, что конфликт не возникает, если параметры связей являются общими для подсистем различного уровня.

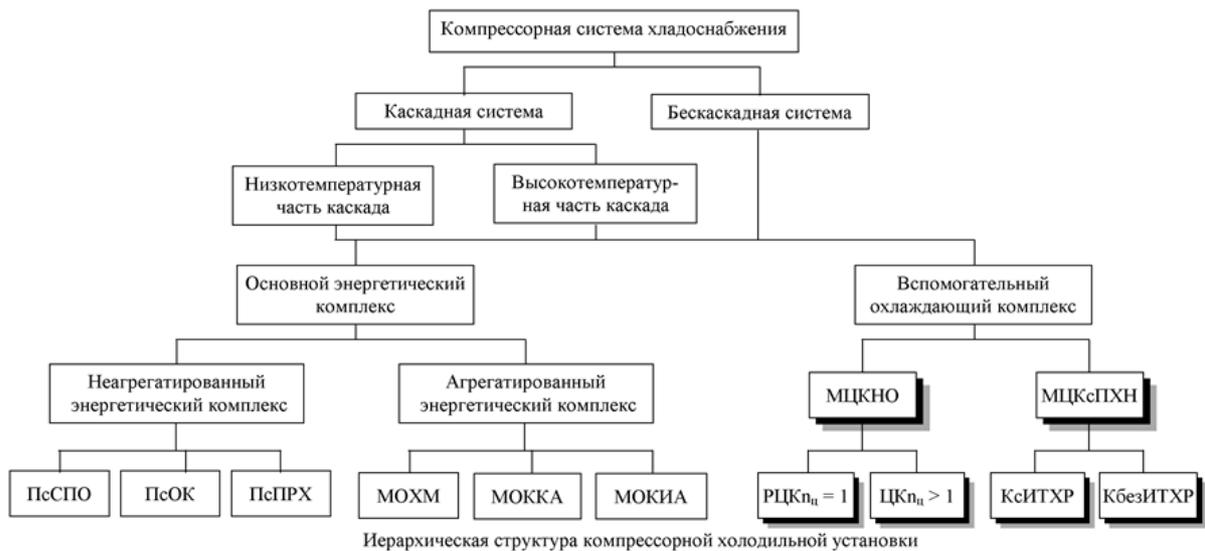
Существует два основных способа координации:

1) Подсистемы низшего уровня решают свои локальные задачи, предполагая параметры связей равными тем, которые указаны подсистемой высшего уровня;

2) Подсистемы низшего уровня решают локальные задачи, предполагая, что параметры связей находятся в пределах некоторых диапазонов значений, указанных подсистемой высшего уровня.

Взаимозависимость координирующих действий подчеркивает, что качество функционирования любой системы холодоснабжения обеспечивается обратной связью, т.е. эффективность работы всей системы определяется скоординированным совместным действием всех подсистем, при этом проблема координации для сложных систем становится весьма значимой и сводится к достижению общей цели, заданной для всей системы холодоснабжения (повышению эффективности всей системы в целом). Иерархия задач математического моделирования, оптимального проектирования и эксплуатации формируется на базе принятой иерархии системы холодоснабжения. При этом чрезвычайно важно правильно определить состав оптимизированных параметров, основные ограничения и критерий оптимальности установки. Для оптимизации холодильных установок, имеющих длительный период функционирования, задача оптимизации может быть сведена к определению такого сочетания термодинамических, расходных, конструктивных параметров и вида схемы установок, при которых производство холода осуществляется с минимальными народнохозяйственными затратами при выполнении технологического регламента и всех внутренних и внешних ограничений.

С учетом функциональных особенностей холодильных установок различного схемного исполнения иерархическая структура компрессорных систем холодоснабжения может быть формализована следующим образом. Каждая часть каскада (или система при бескаскадном исполнении) состоит из основного энергетического комплекса и вспомогательного охлаждающего комплекса, включающего в себя множество потребителей холода (см. рисунок 2.2).



ПсСПО – подсистема сжатия и промежуточного охлаждения; ПсОК – подсистема охлаждения и конденсации хладагента; ПсПРХ – подсистема подготовки хладагента к транспортировке и распределения хладагента по изотермам; МОХМ – множество отдельных холодильных машин; МОККА – множество отдельных компрессорно-конденсаторных агрегатов; МОКИА – множество компрессорно-испарительных агрегатов; МЦКНО – множество циркуляционных контуров непосредственного охлаждения; МЦКсПХН – множество циркуляционных контуров с промежуточным хладоносителем; РЦК ($n_i = 1$) – разомкнутый циркуляционный контур; ЦК ($n_i > 1$) – циркуляционный контур с кратностью циркуляции хладагента $n_i > 1$; КсИТХР – контур с использованием термохимических реакций; КбезИТХР – контур без использования термохимических реакций.

Рисунок 2.2 Иерархическая структура компрессорной холодильной установки [12]

Задачей основного энергетического комплекса является сбор "отработанных" паровых потоков хладагента во всасывающих коллекторах компрессоров, реализация основных процессов холодильного цикла до формирования жидкостного потока перед его транспортировкой к потребителям холода или приборам охлаждения (испарителям). В нем выделяются следующие подсистемы:

- сжатия и промежуточного охлаждения паров хладагента;
- охлаждения и конденсации хладагента;
- подготовки хладагента к распределению по охлаждающим устройствам или потребителям холода различных уровней;
- условно сосредоточенная подсистема, к которой сводится вспомогательный охлаждающий комплекс.

Задачей вспомогательного охлаждающего комплекса является реализация способностей жидкого хладагента или хладоносителя того или иного потенциала (по давлению и температуре) по отводу теплоты на различных температурных уровнях от охлаждаемых объектов. Причем отвод теплоты может осуществляться на одном или нескольких уровнях, что предопределяет соответствующие составы вспомогательных охлаждающих комплексов:

- множество циркуляционных контуров непосредственного охлаждения;

– множество циркуляционных комплексов с промежуточным хладоносителем.

Количество циркуляционных контуров соответствует количеству температур кипения хладагента в системе.

В системах непосредственного охлаждения в состав циркуляционных контуров входят:

– множество разветвленных паровых всасывающих трубопроводов (включая отделители жидкости);

– множество потребителей холода;

– подсистема разветвленных жидкостных трубопроводов;

– подсистема "жидкостный стояк – насосы";

– множество разветвленных парожидкостных обратных трубопроводов;

– множество подсистем "циркуляционный ресивер – насосы".

В системах косвенного охлаждения в состав циркуляционных контуров входят:

– множество потребителей холода (совместно с элементами управления и организации вынужденной локальной циркуляции жидкости);

– множество разветвленных жидкостных трубопроводов;

– множество подсистем «насосы – емкостное оборудование».

На базе указанной формализации предлагается строить:

– иерархию проектно-конструкторских и экспериментально-исследовательских работ;

– методологию структурной и параметрической оптимизации систем холодоснабжения;

– иерархическую структуру математической модели.

Таким образом, согласно предложенной формализации, осуществляется практически весь объем работ, направленных на достижение конечной цели – максимального повышения эффективности систем холодоснабжения.

Как правило, иерархия задач математического моделирования и оптимизации позволяет организовать последовательность решения (этапность). На первых этапах решаются задачи верхних уровней технологической иерархии, которые позволяют сформировать параметры связей и ограничения для каждой из низших подсистем и определить требования к их формированию.

Следует выделить несколько основных этапов системного подхода:

– выделение системы холодоснабжения из общего комплекса технологических производств в виде отдельной хладоэнергетической системы;

– формирование взаимосвязи системы холодоснабжения с другими системами производства;

– формирование схемы холодоснабжения;

- формирование системы взаимосвязи отдельных подсистем;
- формирование комплекса моделей, обеспечивающего решение задач оптимального проектирования или эксплуатации системы холодоснабжения.

Перечисленные этапы системного подхода позволяют в первую очередь решить проблему размерности задачи. Представление системы холодоснабжения в виде иерархической структуры позволяет значительно сократить размерность системы. Очевидно, что такое деление системы холодоснабжения оказывается возможным только с помощью методов взаимной увязки (координирования) отдельных подсистем и элементов. При выделении системы холодоснабжения из общего комплекса предприятия и решении задач оптимального проектирования и управления необходима организация обмена информацией со смежными системами предприятия (энергоснабжение, водоснабжение, технология и др.) с помощью прямых и обратных связей.

Наибольшее значение имеют прямые связи с технологией производства, которые позволяют определить параметры охлаждаемых технологических потоков, требования технологического регламента, точность поддержания параметров и т.д., что в значительной степени влияет на значения тепловых нагрузок, выбор схемы холодоснабжения и конструктивных особенностей холодильного оборудования.

Обмен информацией между отдельными подсистемами непосредственно самой системы холодоснабжения осуществляется с помощью внутренних прямых и обратных связей.

Значительная сложность схем холодоснабжения предприятий определяет целесообразность использования принципа декомпозиции, когда предполагается её деление на ряд соподчиненных подсистем.

Представляется, что наиболее целесообразно выделение определенного количества иерархических уровней в соответствии с предварительной формализацией и целью математического моделирования:

- система холодоснабжения в целом;
- энергетические (основные и вспомогательные) комплексы;
- отдельные подсистемы, включающие в себя группы оборудования;
- отдельные виды оборудования (элементы);
- отдельные элементарные процессы.

Важным этапом, предшествующим разработке математической модели холодильной установки, является выдвижение гипотез о структуре и особенностях функционирования объекта, позволяющих сформировать некоторую логическую схему и представление о системе холодоснабжения, которые в конечном счете преобразуются в некоторый физический или математический аналог объекта-оригинала. Переход от содержательного описания объекта к его математическому анализу называется формализацией.

В этом случае можно считать, что математические модели представляют собой формализованные представления систем холодоснабжения, служащие средством для исследования и прогнозирования их свойств, а также управления ими.

При системном подходе [12] формализация системы холодоснабжения как объекта является базой для построения иерархии и создания методологий проектирования, эксплуатации, исследования. Она рассматривается как отдельная многоэлементная система с иерархической структурой и как квазистационарная физико-техническая система с большим числом внешних воздействий, внутренних взаимосвязей и ограничений.

Для реализации всестороннего исследования системы холодоснабжения предлагается:

- введение универсальности иерархического принципа декомпозиции с использованием обобщенных функциональных особенностей выделенных подсистем;

- осуществление декомпозиции системы на подсистемы, которые имеют максимальную автономность как с позиции проведения предварительных экспериментальных и теоретических исследований, так и проведения синтеза и оптимизации непосредственно в процессе проектирования.

Контрольные вопросы и задания

1. Пояснить цель системного исследования объектов.
2. Определить понятие "система".
3. Иерархическая структура компрессорной холодильной установки.
4. Основные этапы при реализации системного подхода.
5. Особенности формализации системы холодоснабжения как объекта проектирования.

3 ОСОБЕННОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМ

Система холодоснабжения в большинстве случаев представляет собой достаточно сложный объект, что требует знания о количественных и качественных закономерностях, свойственным всем процессам в объекте. В связи с этим приобретает все большее значение изучение свойств и закономерностей сложных объектов на основе методов моделирования.

Наибольшее распространение в холодильной технике имеет математическое и физическое моделирование.

При физическом моделировании изучение любого процесса происходит при его воспроизведении в различных условиях геометрического и физического подобия, анализа влияния различных физических особенностей. Экспериментальные исследования производят всегда непосредственно на изучаемом физическом процессе. Опытные данные представляют в форме зависимостей безразмерных комплексов, составленных комбинаций различных физических величин и линейных размеров (критериев подобия Nu , Re , Pr и др.). Эта безразмерная форма позволяет распределить полученные зависимости на группу подобных между собой явлений, характеризующихся постоянством критериев подобия.

При проектировании сложных энергетических объектов используются в первую очередь математические модели, отражающие закономерности процессов функционирования объектов, такие модели называются функциональными (аналитические и др.). При формировании схем холодильных установок необходимо использование математических моделей, отражающих структурные свойства объекта, в этом случае используется структурно-системные модели (в виде графов, матриц инцидентий, списков и т.д.). Классификация математических моделей приведена на рисунке 3.1. В отличие от физического моделирования математическое моделирование позволяет изучать только те параметры, которые имеют математическое описание и связаны математическими соотношениями в уравнениях, относящихся как к модели, так и к оригиналу.

Для современных стационарных и транспортных систем холодоснабжения характерны следующие тенденции:

- увеличение разнообразия условий функционирования;
- увеличение номенклатуры выпускаемого холодильного оборудования;
- повышение уровня автоматизации;
- повышение требований по безопасности эксплуатации и экономичности.

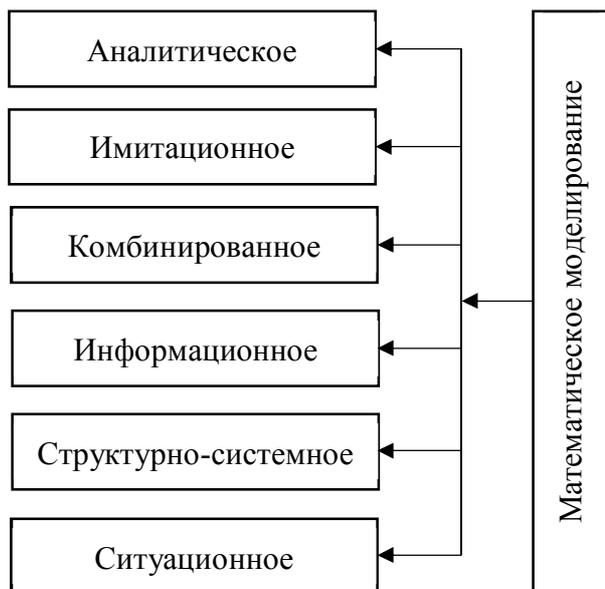


Рисунок 3.1 – Классификация видов математических моделей

При постоянно растущих ценах на оборудование указанные тенденции резко повышают значимость технико-экономических или термоэкономических исследований как при реализации проектных работ, так и в эксплуатации. При этом решаются задачи, связанные с определением оптимальных параметров систем холодоснабжения, типа схем, трассировок трубопроводов, рациональным подбором оборудования и т.д. Всё это ведёт к повышению сложности и трудоемкости проектных работ.

Решение указанных проблем в настоящее время оказывается невозможным без широкого применения методов математического моделирования и ЭВМ.

Математические функциональные модели делятся по пространственным и временным признакам на:

- статистические модели;
- динамические модели;
- квазистационарные модели;
- модели с сосредоточенными параметрами;
- модели с распределенными параметрами;
- ячеечные модели.

Статистические модели обычно представляют собой систему эмпирических зависимостей, полученных на основе статистического исследования процесса или объекта [13]. При этом любой объект моделирования можно рассматривать как некоторый элемент или комплекс, подверженный воздействию различных параметров и факторов, определяющих течение процессов и характеризующих состояние объекта в

любой момент времени. Обычно все множество параметров и факторов подразделяется на следующие основные группы (см. рисунок 3.2):

- входные (X);
- управляющие (U);
- возмущающие (ζ);
- выходные (Y).

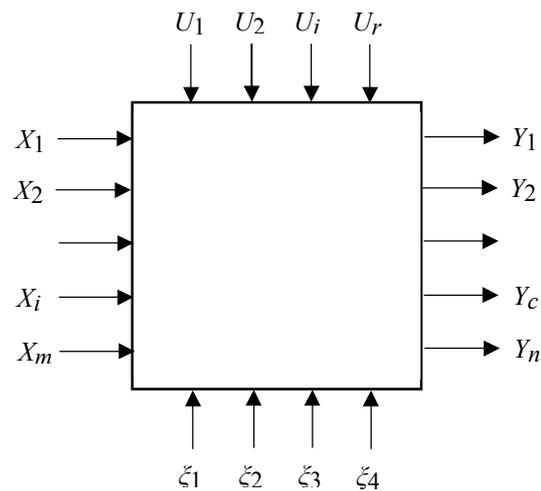


Рисунок 3.2 – Основные воздействующие факторы и параметры, характеризующие состояние объекта. Группы воздействующих параметров: X – вектор входных параметров; U – вектор параметров управления; ζ – вектор возмущающих параметров; Y – вектор выходных параметров.

Значения входных параметров не зависят от режимов процессов, протекающих в объекте моделирования. К управляющим относятся параметры и факторы, на которые можно оказать прямое воздействие в соответствии с теми или иными требованиями, что позволяет управлять процессом. К возмущающим относятся параметры, значения которых могут меняться случайным образом с течением времени и которые недоступны для измерения. Выходными называются параметры, которые определяются режимом функционирования моделируемого объекта и характеризуют его состояние, возникающее в результате воздействия входных, управляющих и возмущающих параметров.

Входными параметрами в большинстве случаев являются параметры охлаждаемых потоков, окружающей среды и т.д. Управляющими параметрами являются параметры воздействия (управления) на характеристики объекта в процессе эксплуатации (изменение расходов, чисел оборотов насосного и компрессорного оборудования и т.д.).

Возмущающими факторами могут быть импульсные случайные изменения тепловых нагрузок (засорение регулирующей арматуры, сбой электроснабжения и т.д.). К выходным параметрам могут быть отнесены холодопроизводительность установки, значения температур кипения, конденсации и т.д.

Описание стационарных процессов в объектах с сосредоточенными параметрами осуществляется обычно с помощью систем алгебраических и трансцендентных уравнений. Для моделирования нестационарных режимов объектов с сосредоточенными параметрами и стационарных режимов объектов с распределенными параметрами используются обыкновенные дифференциальные уравнения. В этом случае в качестве независимых переменных используются время τ и пространственная координата X . Описание динамики объектов с одним распределенным параметром и стационарных режимов с несколькими распределенными параметрами (X, Y, Z) осуществляется с помощью дифференциальных уравнений в частных производных.

Таким образом, *математическая модель* объекта представляет собой замкнутую систему уравнений математического описания, отражающую сущность явлений, протекающих в объекте моделирования и позволяющую с помощью определенного алгоритма проанализировать поведение объекта, т.е. прогнозировать изменение выходных параметров.

Вид математической модели может зависеть как от природы реального объекта, так и от задач исследования объекта, требуемой точности решения задач.

При имитационном моделировании алгоритм воспроизводит процесс функционирования систем во времени, причем имитируются элементарные процессы, составляющие объект, с сохранением его логической структуры и последовательности протекания процессов во времени. Основным преимуществом имитационного моделирования по сравнению с аналитическим является возможность решения более сложных задач. Имитационные модели позволяют достаточно просто учитывать такие факторы, как наличие дискретных и непрерывных элементов, нелинейные характеристики элементов системы, многочисленные случайные воздействия и др., которые часто создают трудности при аналитических исследованиях.

Моделирование может быть комбинированным, если аналитическая модель включает элементы имитационной модели и наоборот. При построении комбинированных моделей производятся предварительная декомпозиция процесса функционирования объекта на составляющие подпроцессы, для одной части которых используются аналитические модели, для другой – имитационные модели.

Метод имитационного моделирования применяется для оценки вариантов структуры систем, эффективности различных алгоритмов

управления, влияния параметров системы. Имитационное моделирование может быть положено в основу структурного и параметрического синтеза систем холодоснабжения.

Математическая модель обеспечивает возможность получать формализованное и приближенное описание объекта, основных соотношений между параметрами объекта (системы) и отдельных его элементов, характеристиками внешних технологических и экономических связей, системой ограничений и критерием оптимальности систем. Схема реализации процесса моделирования систем холодоснабжения представлена на рисунке 3.3.

В процессе компьютерного оптимального проектирования систем холодоснабжения различных производств обычно имеют место прямые и обратные информационные потоки, которые используются при формировании исходных данных для расчета отдельных процессов, элементов, видов оборудования и всей системы в целом, включая расчет технико-экономических показателей. Система связей математических моделей и информационных потоков представлена на рисунке 3.4.

Математическое описание отдельных потребителей холода предприятий (охлаждаемых помещений) включает обычно объемно-планированные и конструктивные решения отдельных камер и размещенное в них холодильно-технологическое оборудование.

Для размещения холодильно-технологического оборудования в транспортных комплексах обычно используются стандартные корпуса рефконтейнеров. Все рефконтейнеры с учетом особенностей теплоизоляционных конструкций предназначены для использования в соответствующем диапазоне температур

класс А – диапазон температур $+12\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $0\text{ }^{\circ}\text{C}$;

класс В – диапазон температур $+12\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$;

класс С – диапазон температур $+12\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$;

класс D – постоянная внутренняя температура не превышает $0\text{ }^{\circ}\text{C}$;

класс E – постоянная внутренняя температура не превышает $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$;

класс F – постоянная внутренняя температура не превышает $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

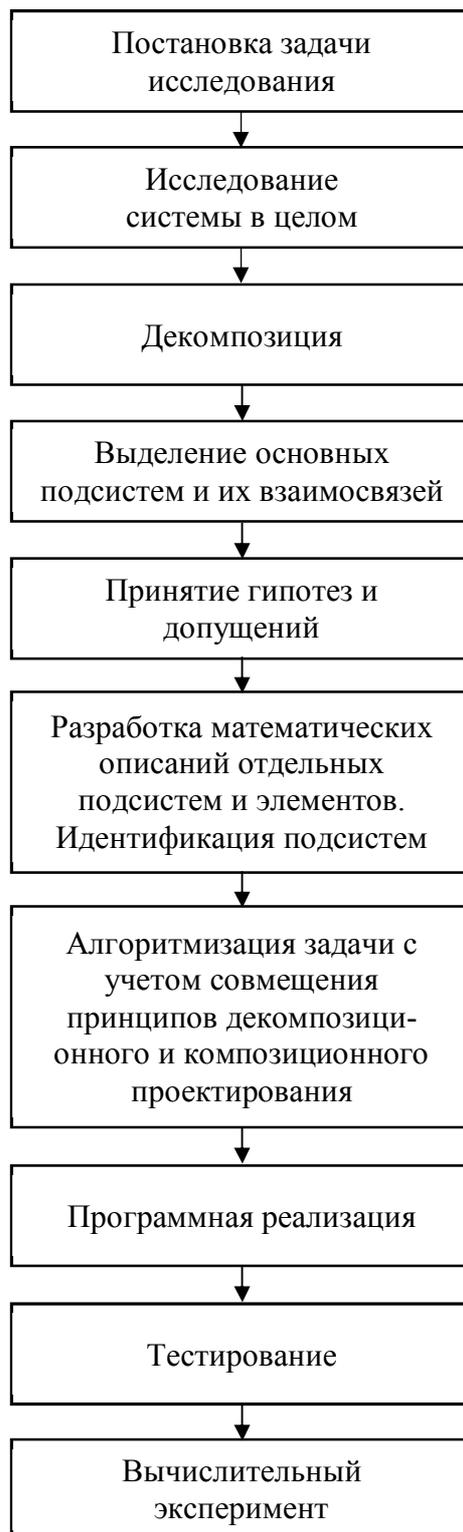


Рисунок 3.3 – Схема реализации процесса моделирования сложных систем холодоснабжения



Рисунок 3.4 – Система связей математических моделей и информационных потоков в процессе оптимального компьютерного проектирования.

ТЭО – технико-экономическое обоснование; ТЭП – технико-экономические показатели, ОЭК – основной энергетический комплекс, ВОК – вспомогательный охлаждающий комплекс

Моделирование системы холодоснабжения состоит из ряда взаимосвязанных этапов:

- постановка задачи моделирования;
- составление математического описания;
- алгоритмизация математического описания;
- проектирование;
- проверка адекватности математической модели.

Постановка задачи моделирования включает в себя следующие этапы:

- 1) Подготовка и систематизация исходной информации;
- 2) Системное представление холодильной установки;
- 3) Определение цели и критерия оптимальности.

В процессе моделирования необходимо при заданных параметрах охлаждаемых потоков, конструкции устройств и их расположении в

пространстве выбрать тип схемы, хладагента, хладоносителя, количество изотерм кипения, распределить по ним потребители холода, а также выбрать такую структуру связей между отдельными подсистемами и элементами систем, которые обеспечивают условие оптимальности при фиксированных ограничениях на структурные параметры.

Процессу математического описания предшествуют подготовительные этапы:

- выбор типа схем холодоснабжения;
- выбор хладагентов и хладоносителей;
- выбор количества изотерм кипения и распределение по ним всех потребителей холода.

Выбор типа схем базируется на последовательном эмпирико-эвристическом анализе результатов предварительных исследований и следующих характеристик производства (объекта):

- типа производства (объекта);
- требований экологии;
- типа охлаждающих устройств;
- степени агрегатирования холодильного оборудования;
- расстояния от компрессорной станции до максимально удаленных потребителей холода по отдельности для всех температур кипения;
- требований по безопасности рабочих веществ производства.

Алгоритм выбора типа схем реализует проверку условий соответствия характеристики производства той или иной схеме холодоснабжения с учетом уровня технико-экономических показателей. Условия соответствия предварительно сформированы по результатам предварительных теоретических и экспериментальных исследований.

Типы хладагентов определяются на основе эмпирико-эвристического анализа следующих характеристик производства:

- требований экологии;
- типа схемы холодоснабжения;
- типа (категории) производства;
- ограничений по значениям минимальных давлений кипения в отдельных частях каскада (при каскадном варианте схемы);
- ограничений по значениям максимальных давлений конденсации в отдельных частях каскада;
- стоимости хладагента и др.

Следует отметить повышенную сложность выбора хладагентов, что обусловлено требованиями ряда международных соглашений о необходимости снижения интенсивности разрушения слоя стратосферного озона и парникового эффекта в атмосфере из-за выбросов хладагентов. Очевидно, что целый ряд решений о прекращении выпуска оборудования, работающего на R22, R134a и др. хладагентах базируется на экономической политике и заинтересованности ряда ведущих стран, диктующих в

настоящее время положение дел на рынке холодильных технологий и оборудования. Возникает множество вопросов по стратегии последовательности исключения хладагентов, некоторые из них (например, R134a и др.) совсем недавно предлагались к широкому использованию и имеют незначительное суммарное эквивалентное воздействие на потепление. Для оценки этого воздействия введен фактор «TEWI» (*Total Equivalent Warming Impact*), хотя результат определяется главным образом выбросами CO₂.

Из-за ограниченного количества хладагентов, которые могут быть использованы в настоящее время при реконструкции и проектировании холодильных установок, процедура выбора значительно упрощается. Очевидно, что в процедуре выбора должна быть реализована сравнительная оценка эффективности хладагентов:

- по общим технико-экономическим показателям;
- по энергетическим показателям;
- по интенсивности теплоотдачи в процессах кипения и конденсации;
- по уровням рабочих диапазонов давлений и температур в процессах сжатия в компрессорах.

Информация по основным хладагентам, которые активно используются в России, приведена в таблице 3.1. Информация по хладагентам приведена в таблицах 3.2-3.4.

Таблица 3.1 – Физико-химические свойства рабочих веществ

Показатель	R22	R407a	R134a	R404a	R744	R717
Химическая формула	CHClF ₂	–	CH ₂ FCF ₃	–	CO ₂	NH ₃
Относительная плотность газовой фазы (по воздуху)					1,51	0,6
Температура кипения t ₀ при 760 мм.рт.ст., °C	-40,8	-45,5	-26,1	-46,5	-78,5	-33,3
Пределы воспламеняемости в смеси с воздухом при н.у., %	–	–	–	–	–	15/28
Температура воспламенения, °C	–	–	–	–	–	630
Удельная теплота парообразования при p = 0,1 МПа, кДж/кг	182,3	235,5	216,9	206,8	570,9	1369,7
Потенциал разрушения озона, R11 = 1	0,05	0	0	0	0	0
Потенциал глобального потепления, CO ₂ = 1	1700	1620	1300	3850	1	0

При выборе хладагентов дополнительно учитываются:

- теплофизические характеристики (температура замерзания, концентрация, вязкость, теплоемкость, плотность);
- интенсивность коррозионных процессов для различных металлов;
- стабильность теплофизических характеристик;
- требования по безопасности (пищевые и гигиенические сертификаты и др.);
- стоимость и др.

Таблица 3.2 – Типы хладоносителей

Солевые растворы	Хлористый кальций, хлористый натрий
Спиртосодержащие растворы	Метанол, этанол, изопропанол
Гликолевые растворы	Этиленгликоль, пропиленгликоль
Растворы на основе солей органических кислот	Щелочная соль органической карбоновой кислоты
Прочие	Фтор, силикон

Таблица 3.3 – Диапазон рабочих температур хладоносителей

Тип хладоносителя	Рабочая температура, °С			
	-60	-40	-20	0
Хлористый кальций				
Пропиленгликоль				
Этиленгликоль				
Колд Брайн FP-40				
Фуд Брайн FP-40				
Спиртосодержащие растворы				
ВПГЭ (электролитсодержащие водно-пропиленгликолевые растворы)				

Таблица 3.4 – Сравнение динамической вязкости хладоносителей

Рабочая температура, °С	Хладоносители						
	Колд Брайн FP-40	Хлористый кальций	Спиртосодержащие	Этиленгликоль	Пропиленгликоль	ВПГЭ	Нордвэй-ПРО
	Вязкость, мПа·с						
минус 50	30	–	>100	–	–	85 ⁽⁻⁴⁵⁾	–
минус 40	17	–	65	>100	–	70	–
минус 20	6	14,5	19	34	150	20	107
0	3	4	5	11	31	4	22,8

В последнее время реализована разработка новых низкотемпературных хладоносителей на основе этиленгликоля, пропиленгликоля, этилкарбитола (разработки ООО "Спектропласт" и др.).

Формирование множества температур кипения, типа холодильного цикла и распределение охлаждаемых потоков по изотермам кипения хладагентов осуществляется предварительно исходя из условия минимальности приведенных затрат, обусловленных суммарными эксергетическими потерями и стоимостью холодильно-технологического оборудования (испарителей, воздухоохладителей и др.).

При этом достигается условие:

$$\min \left(\sum_i \sum_j \text{ПЗ}_{ij} = \left(\sum_i \sum_j K_{ij} + \sum_i K_{wi} \right) \cdot \frac{1}{T} + c_{1э} \cdot \left(\sum_i \sum_j D_{ij} + \sum_i D_{wi} \right) \right),$$

где ПЗ_{ij} – суммарные приведенные затраты;

K_{ij} – капитальные затраты на j -ый аппарат i -го температурного уровня;

T – срок эксплуатации оборудования;

D_{ij} – сумма тепловых и гидравлических потерь эксергии в холодильно-технологическом оборудовании;

$c_{1э}$ – стоимость 1 кВт·ч электроэнергии.

Необратимые тепловые потери эксергии в результате отвода тепла от охлаждаемого продукта, т.е. передачи тепла с уровня $T_{\text{пр}ij}^{\text{ср}}$ на уровень температуры кипения T_{oi} определяются согласно уравнению

$$D_{t_{ij}} = Q_{\text{пр}ij} \left(\frac{T_{\text{ос}}}{T_{oi}} - \frac{T_{\text{ос}}}{T_{\text{пр}ij}^{\text{ср}}} \right).$$

Необратимые потери эксергии, обусловленные гидравлическими потерями на циркуляцию охлаждаемых потоков и хладагентов, определяются согласно соотношению:

$$D_{r_{ij}} = T_{\text{ос}} \left(\frac{N_{oi}}{T_{oi}} + \frac{N_{\text{пр}ij}}{T_{\text{пр}ij}^{\text{ср}}} \right),$$

где N_{oi} – потери мощности насосов на циркуляцию хладагента i -го температурного уровня;

$N_{\text{пр}ij}$ – потери мощности насосов на циркуляцию охлаждаемого j -го потока на i -ом температурном уровне.

Суммарные потери эксергии в каждом холодильно-технологическом оборудовании равны

$$D_{ij} = D_{t_{ij}} + D_{r_{ij}}.$$

Потери эксергии в испарителях D_{wi} рассчитываются аналогично при средних значениях температур хладоносителя T_{si} .

Как уже отмечалось, для создания математической модели системы холодоснабжения моделируемая установка выделяется как характерная подсистема предприятия. Внешние технологические и экономические связи заменяются их обобщенным описанием или количественными характеристиками. При этом система холодоснабжения предприятия рассматривается как единый системный комплекс различных подсистем, элементов и процессов, предназначенный для выработки энергии холода. Всякое изменение любого параметра или элемента установки влияет на параметры и характеристики всей системы. Это влияние для каждого элемента системы передается через совокупность его граничных физических, термодинамических и расходных параметров. Термодинамические и расходные параметры определяют направленность и характер протекания процессов в отдельных подсистемах и элементах

оборудования. Совокупность значений указанных параметров определяет режимное состояние системы холодоснабжения в целом. Каждый элемент системы предназначен для реализации конкретного технологического процесса. В качестве элементов могут рассматриваться компрессоры, насосы, теплообменники и др.

При реализации процессов проектирования можно допустить, что все процессы протекают в системе непрерывно и соответствуют требуемой стационарной или меняющейся тепловой нагрузке.

Контрольные вопросы и задания

1. Классификация видов математических моделей.
2. Привести перечень основных воздействующих факторов и параметров.
3. Дать схему реализации процесса моделирования сложных систем.
4. Привести систему связей математических моделей и информационных потоков.
5. Указать основные этапы математического моделирования систем холодоснабжения.
6. Что является условием оптимальности проектных решений?

3.1 Формирование математического описания систем

Цель составления математического описания заключается в выражении словесного описания постановки задачи математического моделирования на языке математики в виде некоторой системы уравнений, неравенств и функциональных соотношений между отдельными параметрами модели.

Математическое описание включает в себя описание схемы технологических связей, например, в виде графа или матрицы соединений, систему балансовых уравнений, характеристики элементов оборудования, систему ограничений в виде неравенств и функцию цели. Способ соединения отдельных элементов между собой представляет сложную комбинацию типовых связей.

Для анализа сложных систем успешно применяется теория графов, при этом появляется возможность кодировать схемы в цифровую форму [14, 15]. Графом в общем случае называется совокупность отрезков произвольной длины и формы, называемых дугами, и точек пересечения дуг, называемых вершинами. Основная топологическая информация,

заклученная в графе, состоит в графическом выражении связей между вершинами графа. Обычно реальной технологической схеме соответствует некоторый эквивалентный по своей топологической структуре граф.

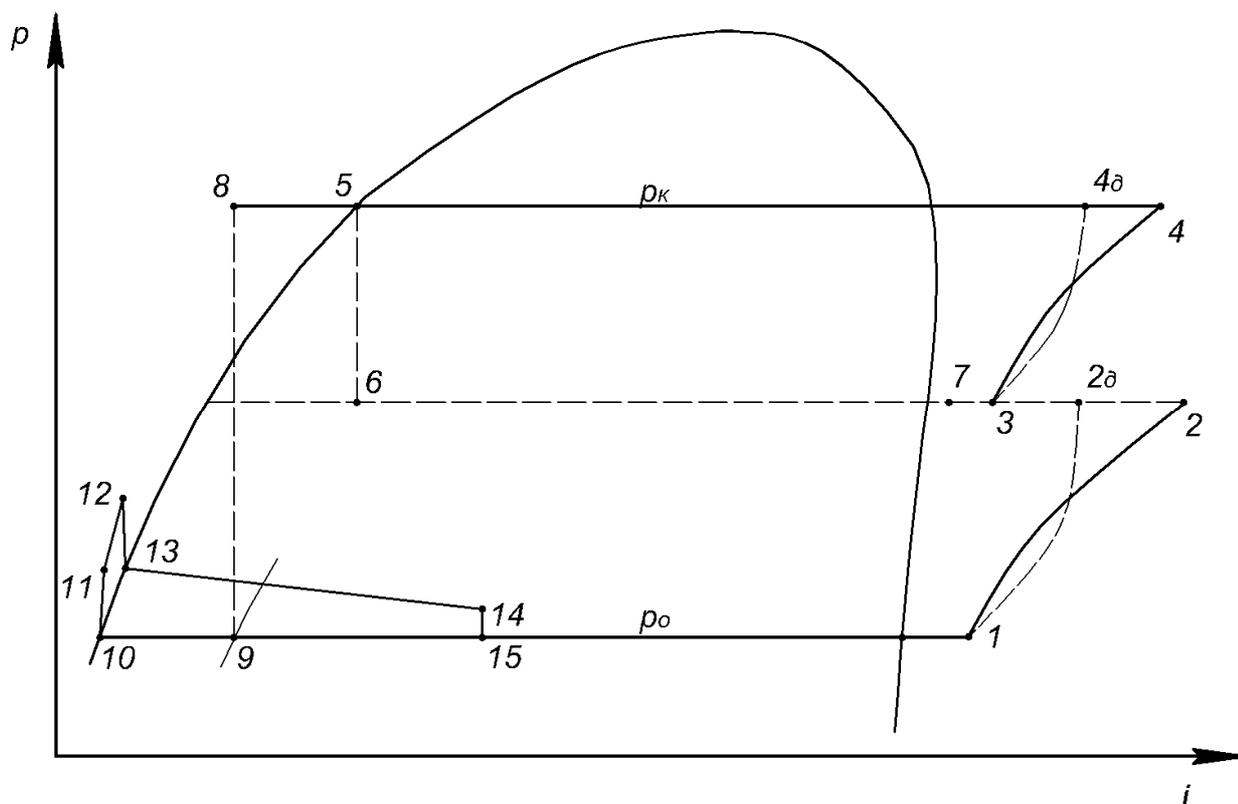


Рисунок 3.5 – Холодильный цикл с экономайзером в $p-i$ диаграмме состояния. Процессы: 1-2, 3-4 – изоэнтальпное сжатие; 1-2д – сжатие пара в присутствии масла; 3-4д – сжатие паров после смешения, в присутствии масла; 4д-5 – охлаждение и конденсация паров; 5-8 – процесс переохлаждения жидкого хладагента; 5-6 – дросселирование части жидкости для переохлаждения основного потока; 6-7 – кипение хладагента в теплообменнике-переохладителе; 8-9 – дросселирование основного потока; 10-11 – влияние столба жидкости перед насосом; 11-12 – повышение давления в насосе; 12-13 – гидравлические потери в трубопроводе; 13-14 – кипение основного потока; 14-15 – потери давления в обратном трубопроводе.

Представление любой схемы в форме графа позволяет осуществить математически строгое и в то же время достаточно наглядное её рассмотрение. Систему элементов и связей холодильной установки можно представить в виде ориентированного графа, в котором каждому элементу оборудования соответствует вершина графа, а связям между элементами оборудования или с внешними объектами соответствуют дуги графа.

Любая схема может быть описана при расчетах на ЭВМ двумя способами:

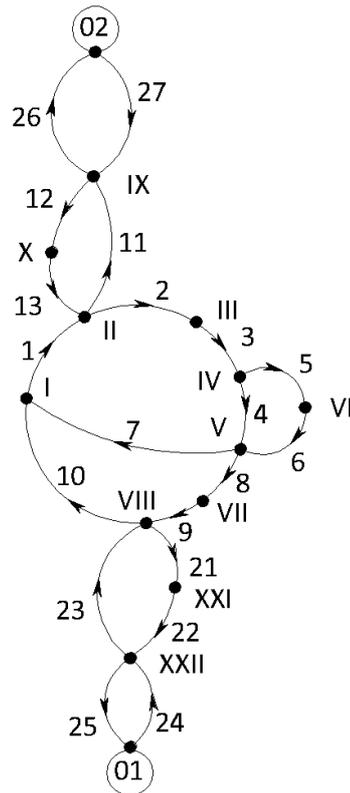


Рисунок 3.7 – Ориентированный граф системы холодоснабжения

Более компактное представление любой схемы холодоснабжения (как и любой другой) можно реализовать с помощью списка связей (по сравнению с матрицами инцидентности). В списках последовательно описывается схема связей каждого элемента системы, в скобках указываются сначала номера элементов, в которые входят дуги, выходящие из рассматриваемого элемента, и номера этих дуг, а затем номера элементов, из которых выходят дуги и входят в рассматриваемый элемент, и номера соответствующих дуг. Схема холодильной установки, представленная на рисунке 3.6, может быть описана с помощью списка связей:

I (II,1/VIII,10; V,7), II (III,2; IX,11/I,1; X,13), III (IV,3/II,2), IV (V,4; VI,5/III,3), V (VII,8; I,7/IV,4; VI,6), VI (V,6/IV,5), VII (VIII,9/V,8), VIII (I,10; XXI,21/XXII,23; VII,9), X (II,13/IX,12), XXI (XXII,22/VIII,21), XXII (VIII,23; 01,25/XXI,22; 01,24), IX (X,12; 02,26/II,11; 02,27).

Очевидно, что элементы с внешними потоками и соответствующие им дуги получают свои коды уже на стадии формирования технологических схем производств, поэтому при кодировании остальных элементов системы это обстоятельство учитывается. Последовательное формирование описания основного энергетического комплекса завершается включением псевдовершин, которые образуются при стягивании всех вершин контуров вспомогательных охлаждающих комплексов, и реализацией проверки на замкнутость двух подграфов, соответствующих отдельным частям каскада (при каскадных схемах). Первоначально формируются структуры основных

энергетических комплексов с распределением потребителей холода по температурам кипения хладагента, в последующем формируются контуры вспомогательных комплексов.

Формирование схем осуществляется на основе результатов предварительных исследований и использования архива структур.

Расчет любого замкнутого контура сводится к расчету разомкнутого контура за счет разрыва потоков в сечениях с минимальной стоимостью эксергии потока (после потребителей холода), что позволяет упростить схемы расчетов. Каждый модуль (вычислительный блок) позволяет определить значения параметров хладагента или хладоносителя на выходах элементов системы в зависимости от входных параметров.

В разомкнутых схемах появляется возможность организации последовательности расчетов в соответствии с нумерацией дуг и проверкой наличия всей необходимой для расчета исходной информации [11].

Очевидно, что любой элемент может быть рассчитан, если информация с входными потоками достаточна для расчета, желательно при этом иметь возрастающую последовательность как элементов в схеме, так и дуг. Организация последовательного расчета основного и вспомогательного контуров на принципах термоэкономики представлена на рисунке 3.8.

Математическое описание отдельных подсистем и элементов оборудования сводятся к формированию сложных зависимостей различного ряда в явной и неявной форме и определению следующих основных характеристик:

- 1) изменения давления каждого j -го потока в каждом k -ом элементе;
- 2) изменения энтальпии;
- 3) изменения эксергии;
- 4) средней скорости потока;
- 5) средней, минимальной и максимальной температур стенки;
- 6) среднего значения плотности теплового потока.

Установление указанных характеристик является задачей теплового, гидравлического и прочностного расчета элементов. Система уравнений балансов во всех элементах холодильной установки устанавливает такое соотношение между параметрами связей, которое обеспечивает выполнение технологического регламента.

Для каждого элемента холодильных установок формируется определенное множество характеристик, через которые выражаются

взаимосвязи граничных параметров процессов (т.е. параметров связей), отдельные ограничения на параметры и экономические показатели.

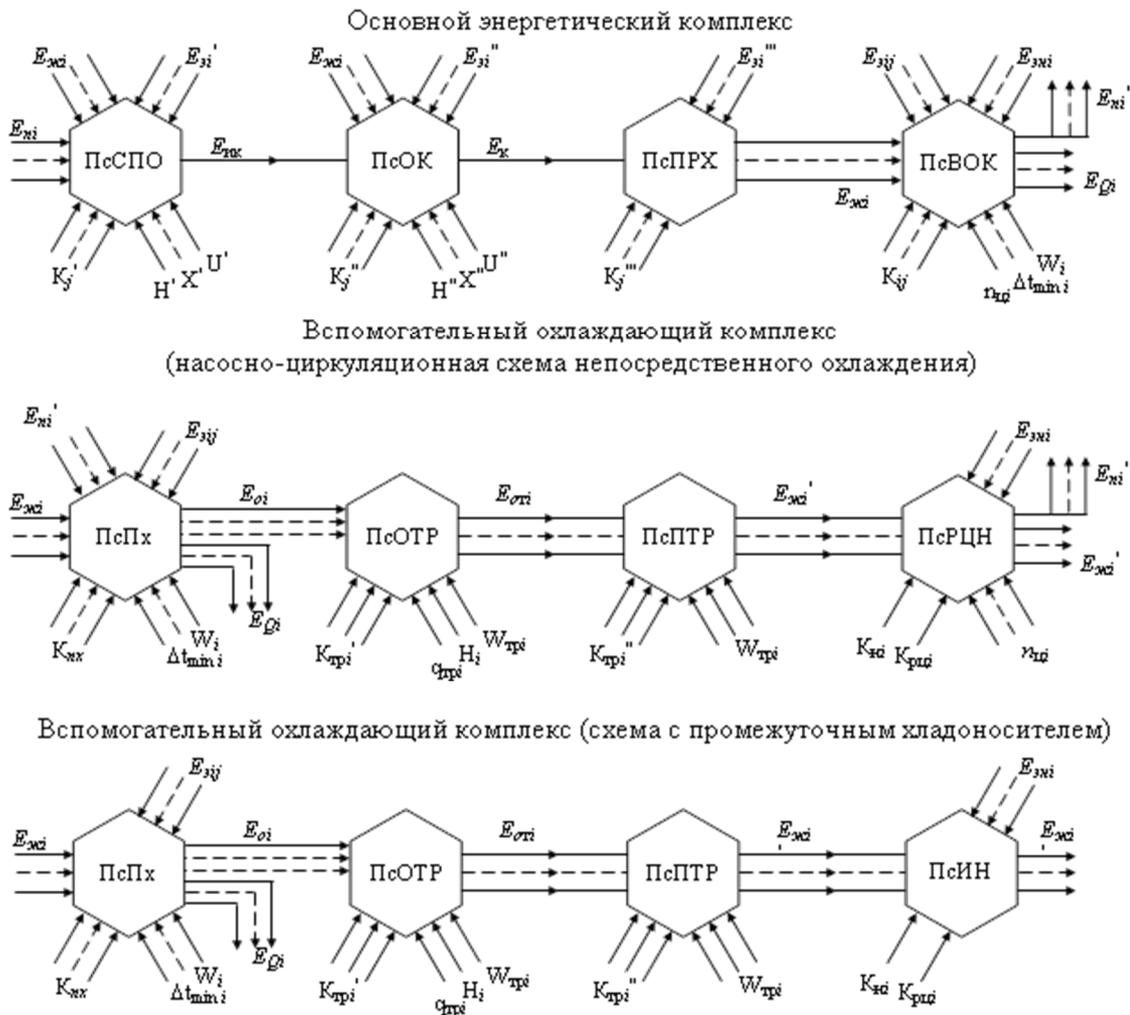


Рисунок 3.8 – Организация последовательного расчета основного и вспомогательного контуров системы холодоснабжения на принципах термоэкономики: ПсСПО – подсистема сжатия и промежуточного охлаждения паров хладагента; ПсОК – подсистема охлаждения и конденсации хладагента; ПсПРХ – подсистема подготовки хладагента к транспортировке и распределения хладагента по изотермам; ПсВОК – условно сосредоточенная подсистема вспомогательного охлаждающего комплекса; ПсПХ – подсистема потребителей холода (охлаждающих устройств); ПсОТР – подсистема обратных трубопроводов; ПсПТР – подсистема подающих трубопроводов; ПсРЦН – подсистема "циркуляционные ресиверы – насосы"; ПсИН – подсистема "испаритель – насосы".

Соотношение между термодинамическими и расходными параметрами связей, которое обеспечивает получение заданной

стационарной нагрузки установки, формируется с помощью системы уравнений балансов для всех элементов системы:

1) уравнение баланса массовых расходов для каждого m -го потока j -го элемента оборудования

$$\sum_{i=1}^{I_{jm}} G_i = 0,$$

2) уравнение изменения энтальпии

$$(i_1 \pm \Delta i - i_2)_{jm} = 0,$$

3) уравнение изменения эксергии

$$(e_1 \pm \Delta e - e_2)_{jm} = 0,$$

где $e = (i - i_0) - T_{oc}(S - S_0)$;

i_0, S_0 – энтальпия и энтропия потока при параметрах окружающей среды; e – эксергия;

4) уравнение гидравлического баланса

$$(p_1 \pm \Delta p - p_2)_{jm} = 0,$$

5) уравнение баланса энергии (без учета потерь в окружающую среду)

$$\sum_{jm} \sum G_{jm} \cdot i_{jm} + N_{nj} + Q_{nj} = 0,$$

где N_n – подведенная или отведенная внутренняя мощность;

Q_n – подведенный или отведенный тепловой поток.

Термодинамические, расходные и конструктивные параметры холодильной установки не могут принимать произвольные значения, они могут меняться лишь в пределах физически возможных и технически осуществимых состояний системы. Обычно вводятся ограничения на следующие основные параметры:

- скорости потоков пара и жидкости во всех элементах системы;
- значения разности температур сред;
- максимально допустимые значения давлений нагнетания;
- максимально допустимые значения температур нагнетания;
- минимально допустимые значения давлений всасывания и др.

Ограничения обычно записываются в виде неравенств совокупностей параметров. Например, для скорости пара W можно записать неравенство вида

$$W^{**} \leq W \leq W^*,$$

где W^* и W^{**} – максимальное и минимальное допустимые значения скорости соответственно в рассматриваемом потоке пара. Все перечисленные ограничения определяют в многомерном пространстве переменных некоторую допустимую область. Все термодинамические, расходные и конструктивные параметры в процессе оптимизации холодильных установок могут принимать лишь такие значения, которые находятся внутри или на границе допустимой области. Устное описание допустимой области изменения параметров входит в общематематическое описание

объекта и является необходимым условием при формировании задачи оптимизации любой системы холодоснабжения.

Контрольные вопросы и задания

1. Определите понятие "математическое описание".
2. Каковы методы математического описания схем?
3. Описание схемы холодильной установки с помощью "списка связей".
4. Дать перечень характеристик потоков в каждом контрольном сечении.
5. Организация последовательного расчета основного и вспомогательного контуров системы ХС.
6. Ограничения на основные параметры потоков.

3.2 Понятие функции цели. Нормативные методы расчета технико-экономических показателей

В наиболее полной постановке задача комплексной оптимизации холодильной установки включает оптимизацию структурных, термодинамических, расходных, управляющих и др. параметров при существующих тарифах на электроэнергию, воду, материалы и т.д.

Очевидно, что конечной целью любого проектирования или реконструкции предприятия является получение максимального экономического эффекта. При этом предусматривается два подхода:

1) оценка эффективности систем холодоснабжения при сохранении технологического регламента, мощности технологического производства и заданном сроке окупаемости капитальных вложений (за счет использования известного экономического показателя – удельных приведенных затрат);

2) оценка максимального эффекта, полученного при любом объеме развития производства, т.е. изменения технологического регламента, номенклатуры выпускаемой продукции, мощности производства и т.д.

В первом случае пользуются таким известным экономическим показателем как удельные приведенные затраты:

$$ПЗ = \frac{К}{Т} + Э,$$

где К – капитальные затраты;

Э – эксплуатационные затраты;

Т – срок окупаемости капитальных вложений.

Противодействие двух основных составляющих (К и Э) предопределяет необходимость поиска экстремума функции ПЗ. Качественный характер изменения основных величин, входящих в уравнение, в зависимости от суммы среднелогарифмических разностей температур в конденсаторе Θ_k и испарителе $\Theta_{и}$ представлен на рисунке 3.9.

Очевидно, что задача оптимизации холодильной установки в этом случае сводится к достижению условия

$$\min \text{ПЗ}(H, X, U),$$

где H – вектор структурных параметров;

X – вектор теплофизических параметров;

U – вектор параметров управления.

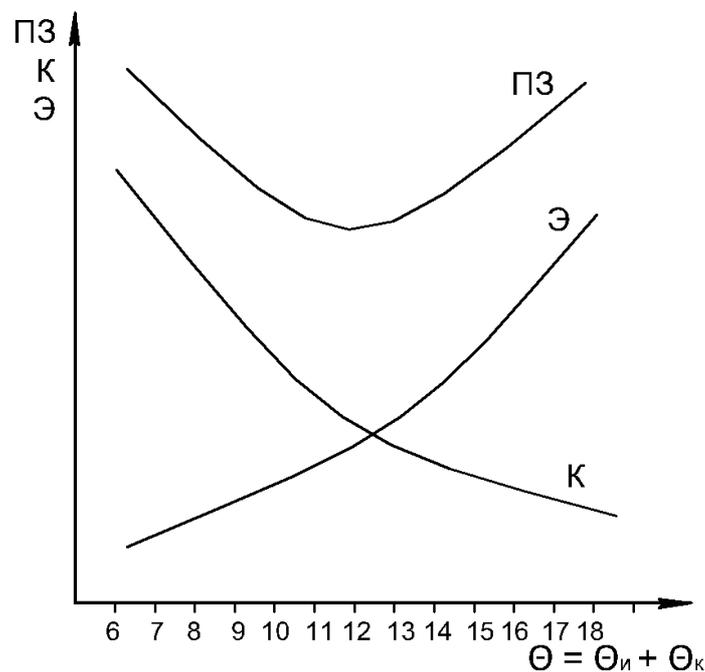


Рисунок 3.9 – Характер изменения технико-экономических показателей от суммарной величины среднелогарифмических разностей температур в конденсаторе Θ_k и испарителе $\Theta_{и}$

Во втором случае в качестве итогового показателя технико-экономической эффективности системы холодоснабжения на стадии проектирования согласно действующим "Методическим рекомендациям по оценке эффективности инвестиционных проектов" [16] выступают следующие показатели:

- чистый дисконтированный доход (ЧДД) или интегральный эффект (ИД);
- индекс доходности;
- внутренняя норма доходности (ВНД);

– срок окупаемости и др.

Величина ЧДД вычисляется по формуле:

$$\text{ЧДД} = \sum_{t=0}^T (R_t - Z_t) \frac{1}{(1 + E_t)^t},$$

где R_t – результаты, достигнутые на t -ом шаге расчета;

Z_t – затраты, осуществляемые на том же шаге;

T – горизонт расчета (равный номеру шага расчета, на котором производится ликвидация объекта);

E_t – норма дисконта, служащая для приведения разновременных затрат к ценности в начальном периоде.

На практике часто пользуются модифицированной формулой капитального вложения. При этом сумма дисконтированных капиталовложений определяется по соотношению

$$K = \sum_{t=0}^T K_t \frac{1}{(1 + E_t)^t}.$$

Тогда соотношение для ЧДД примет вид

$$\text{ЧДД} = \sum_{t=0}^T (R_t - Z_t) \frac{1}{(1 + E_t)^t} - K.$$

Индекс доходности представляет собой отношение суммы приведенных эффектов к величине капиталовложений:

$$\text{ИД} = \frac{1}{K} \sum_{t=0}^T (R_t - Z_t) \frac{1}{(1 + E_t)^t}.$$

На рисунке 3.10 представлен график зависимостей R_t и Z_t на горизонте расчета. При этом предполагается, что основные вложения в проект были реализованы в течение первых четырех лет, ввод первой очереди предприятия осуществляется через два года после начала строительства, выход на полную мощность закончится на пятом году от начала строительства. Эффект от проекта можно графически оценить в виде разности площадей под линиями R_t и Z_t .

Задача оптимального проектирования в этом случае сводится к достижению условия

$$\max \text{ЧДД} (H, X, U).$$

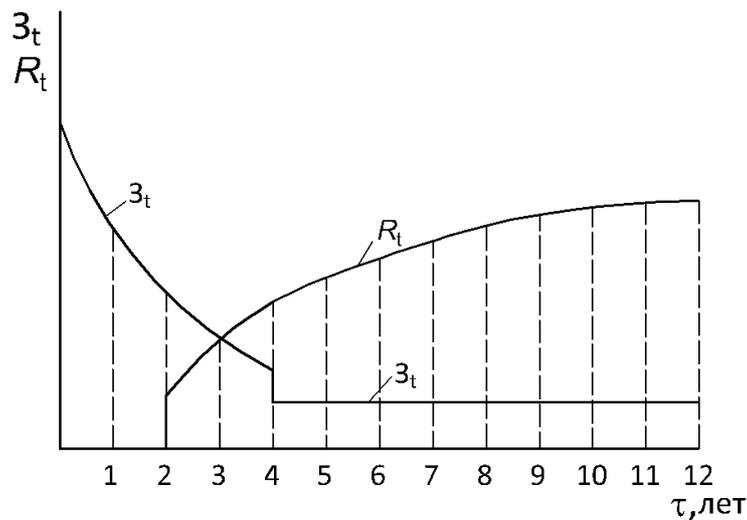


Рисунок 3.10 – Характер изменения R_t и Z_t на горизонте расчета

Внутренняя норма доходности (ВНД) представляет собой ту норму дисконта ($E_{ВН}$), при которой величина приведенных эффектов равна приведенным капиталовложениям, при этом $E_{ВН}$ является решением уравнения

$$\sum_{t=0}^T \frac{R_t - Z_t}{(1 + E_{ВН})^t} = \sum_{t=0}^T \frac{K_t}{(1 + E_{ВН})^t}$$

ВНД проекта определяется в процессе расчета и сравнивается с требуемой инвестором нормой дохода на вкладываемый капитал.

Срок окупаемости представляет собой минимальный временной интервал от начала проекта, за пределами которого ЧДД ≥ 0 , т.е. это – период, начиная с которого первоначальные вложения покрываются суммарными результатами его осуществления. Результаты и затраты, связанные с осуществлением проекта, можно вычислять с дисконтированием или без него (результаты будут отличаться). Обычно рекомендуется срок окупаемости определять с использованием дисконтирования. Фактически коэффициент дисконтирования $a_t = 1/(1+E_t)$ осуществляет приведение к базисному моменту времени результатов и эффектов, имеющих место на t -ом шаге расчета реализации проекта.

Контрольные вопросы и задания

1. Определите понятие "функция цели".
2. Основные показатели эффективности системы холодоснабжения
3. Анализ характера изменения затрат на горизонте расчета.

4 СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМ ХОЛОДОСНАБЖЕНИЯ

Холодильная техника находит широкое применение на предприятиях пищевой, нефтехимической, нефтеперерабатывающей и других отраслей промышленности, причем затраты на производство умеренного холода составляют значительную часть общей суммы затрат на всё технологическое производство (до 25 %).

Высокий уровень технического прогресса привел к созданию высокоинтенсивных технологических процессов, агрегатов большой единичной мощности, что предопределило резкое увеличение холодопотребления предприятий.

Производство умеренного холода на целом ряде производств сочетается с процессами низкопотенциального теплоснабжения в соответствующем диапазоне температур, что приводит к дополнительному усложнению систем холодоснабжения. Сложность внутренних взаимосвязей параметров, процессов и характеристик отдельных элементов системы холодоснабжения предопределяет необходимость совершенствования научных, инженерно-технических и технико-экономических решений, обеспечивающих возможность значительного снижения капитальных и энергетических затрат на производство холода и сокращение сроков проектирования. Существенное повышение качества проектирования систем холодоснабжения возможно за счет интенсификации и координирования научно-исследовательских работ, направленных на создание перспективных и надежных систем холодоснабжения и рациональных способов их регулирования, ускорение разработки их математического описания с целью последующего использования в процессах проектирования [18]. При этом возникает необходимость решения научно-технических проблем холодильной техники, связанных с разработкой современных методов автоматизированного проектирования с помощью ЭВМ, обеспечивающих возможность проведения оптимизационных проектных исследований систем холодоснабжения и координирование результатов этих исследований с результатами исследований других подсистем технологического производства с целью достижения оптимальности общего решения.

Сложные системы холодоснабжения крупных производств разрабатываются кооперацией отдельных проектных и проектно-конструкторских организаций, подразделений и отделов. Методические положения по координации многоуровневых процессов автоматизированного проектирования отдельных подсистем или узлов в настоящее время практически отсутствуют. Используемый метод итерационного последовательного согласования технических решений не

позволяет получать оптимальные решения без строгих координирующих воздействий, при разработке которых имеются значительные затруднения как научного, так и организационного характера.

Наибольшие трудности возникают при проектировании сложных систем большой мощности, когда предполагается создание специального компрессорного и теплообменного оборудования для работы в переменных условиях эксплуатации. Получение указанных моделей возможно как на этапах предварительных общесистемных оптимизационных исследований, так и на выделенных этапах непосредственно в процессе автоматизированного проектирования. Базируясь на указанных подходах, процесс создания методики структурной и параметрической оптимизации систем холодоснабжения можно представить в виде укрупненной структуры (см. рисунок 4.1).

Структурно-параметрическая оптимизация систем холодоснабжения, таким образом, сводится к последовательному синтезу структур и оптимизации параметров отдельных комплексов (подсистем) с привлечением методов сопряжения с другими комплексами (подсистемами) на базе имитационного (регрессионного) моделирования. Имитационные (регрессионные) модели подсистем и элементов представляют собой информационные отражения в детерминированном или индетерминированном виде связи между обобщенными входными параметрами и оптимальным откликом, которые характерны только для конкретной подсистемы с конкретными стоимостными характеристиками используемых материалов, оборудования и энергии [18].

Сформулированная задача структурно-параметрической оптимизации является весьма сложной нелинейной задачей, а так как возникает необходимость оптимизировать состав оборудования, то указанная задача приобретает и комбинаторно-дискретный характер. Достаточно корректное решение может быть получено только при глубоком анализе специфики данной задачи и использовании методов многоуровневой оптимизации.

Развитие вычислительной техники создает условия для перехода к новому этапу автоматизации процесса проектирования, а именно к созданию систем автоматизированного проектирования холодильных установок путем сопряжения локальных вычислительных комплексов, обеспечивающих проектирование отдельных узлов и элементов. При этом необходима разработка таких методов структурно-параметрической оптимизации холодильной установки и отдельных ее подсистем, которые обеспечили бы возможность построения обобщенного алгоритма всего процесса проектирования при реализации произвольной задачи (проектирование новых и реконструкция действующих систем, оценка эффективности применения новых схемных решений, конструкций, процессов и т. д.).

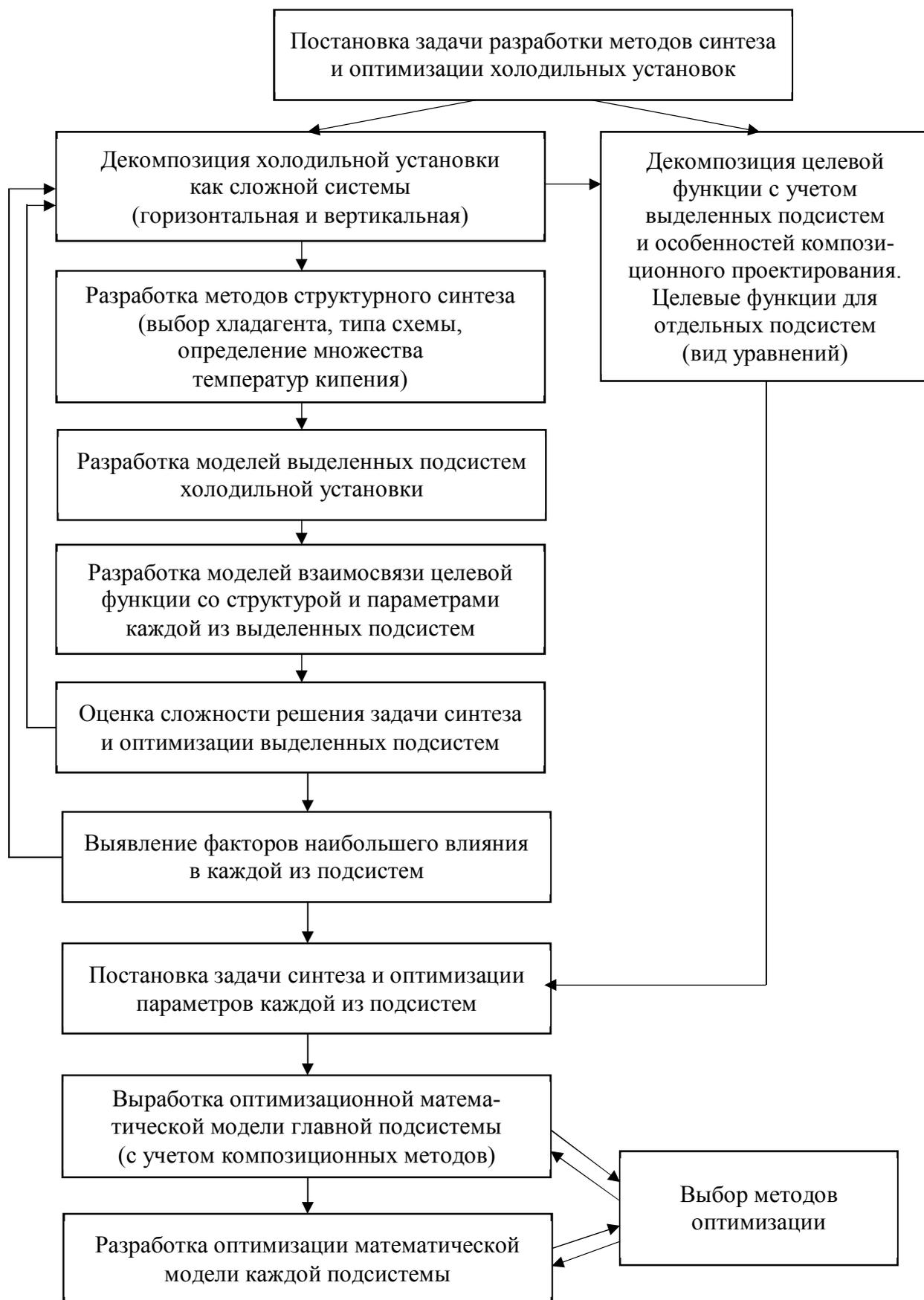


Рисунок 4.1. Принципиальная структура процесса разработки методов синтеза и оптимизации холодильной установки

Фактически необходимо создание скоординированной системы, обеспечивающей возможность не только проектирования, но и оперативной оценки воздействия от реализации любой идеи на эффективность холодильной установки с помощью численного приближенного исследования. Очевидно, что создание такого механизма исследований возможно только при наличии методов структурной и параметрической оптимизации установок с произвольным схемным решением и учетом особенностей эксплуатации и надежности, методов математического моделирования отдельных элементов и элементарных процессов, методов описания свойств рабочих тел, методов автоматизации построения математических моделей сложных систем. При соответствующем техническом и организационном обеспечении этой системы сроки внедрения разработок значительно сокращаются, резко повышается качество проектных работ. Причем разработанное методическое и программное обеспечение должно быть использовано не только для проведения проектных исследований, обработки экспериментальных данных, численных экспериментов, но и для создания подсистем для оценки технического состояния и автоматического управления холодильных установок.

Исходная информация при реализации процессов проектирования систем холодоснабжения объектов включает следующие данные:

- наименование производства (с указанием категории по уровню безопасности);
- климатическая зона;
- ассортимент охлаждаемой продукции или потока (наименование и состав каждого вида продукции или потока);
- требования к конструкциям охлаждающих устройств;
- интенсивность поступления продукции (суточный график поступления или массовые расходы охлаждаемых потоков жидкости или газа);
- интенсивность охлаждения каждого вида продукции;
- значения температур поступающей продукции (охлаждаемых потоков);
- значения температур продукции на выходе из охлаждающих устройств;
- значения давлений охлаждаемых потоков;
- координаты размещения в трехмерном пространстве каждого охлаждающего устройства.

На основании указанной информации формируются графики изменения тепловых нагрузок по отдельным температурам кипения хладагента в течение года, суток или технологического цикла (см. рисунок 4.2).

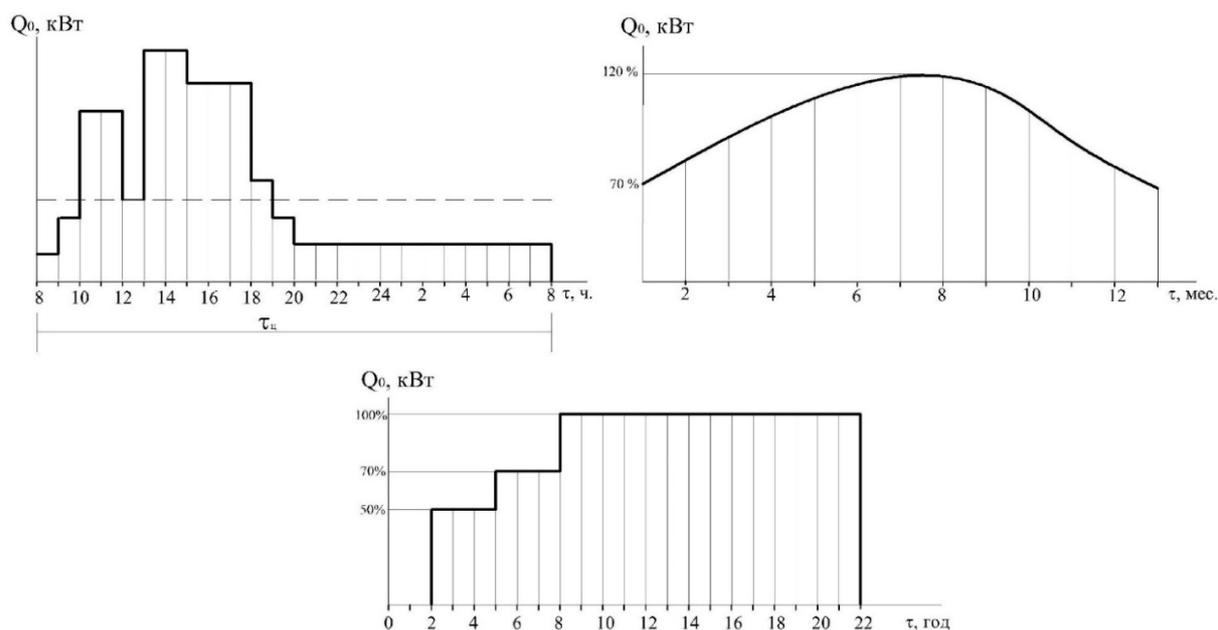


Рисунок 4.2 – Характеры изменения тепловых нагрузок [42]

Наибольшее значение имеют прямые связи с технологией производства, которые определяют параметры охлаждаемых технологических потоков, требования технологического регламента, точность поддержания параметров и т.д., что в значительной степени определяет схему холодоснабжения и конструктивные особенности холодильного оборудования [41, 42].

Важным этапом, предшествующим разработке математической модели холодильной установки, является выдвижение гипотез о структуре и особенностях функционирования объекта, которые позволяют сформировать некоторую логическую схему и представление о системе холодоснабжения, которые, в конечном счете, преобразуются в некоторый физический или математический аналог объекта-оригинала. Переход от содержательного описания объекта к его математическому анализу называется *формализацией*.

В этом случае можно считать, что математические модели представляют собой формализованные представления систем холодоснабжения, служащие средством для исследования и прогнозирования их свойств, а также управления ими.

Значительная сложность схем холодоснабжения предприятий определяет целесообразность использования принципа декомпозиции, когда предполагается её деление на ряд соподчиненных подсистем.

В общем случае задача комплексной оптимизации предприятия в целом сводится к достижению максимального значения чистого дисконтированного дохода [18]

$$\max_{H \in H_0, X \in X_0, U \in U_0} \text{ЧДД}(H, X, U),$$

где H – вектор структурных параметров;

X – вектор внутренних оптимизационных параметров;

U – вектор параметров управления.

Для систем холодоснабжения при условии неизменности технологии производства задача оптимизации сводится к достижению условия

$$\min \int_t \mathcal{Z}_t a_t d\tau = \min \sum_{t=0}^T \mathcal{Z}_t a_t,$$

где \mathcal{Z}_t – затраты, осуществляемые на реализацию проекта в году t ;

T – горизонт расчета;

a_t – коэффициент дисконтирования.

Случайное воздействие предлагается оценивать с помощью его математического ожидания, что приводит к формальному отсутствию неопределенности и возможности использовать дискретно-непрерывные или детерминированные модели, при этом результаты интерпретируются с учетом вероятностной природы указанных параметров. При наличии информации о статистических законах распределения отказов [19, 27], стратегии ППР, интенсивности изменения эксплуатационных параметров отдельных элементов и схеме связей между ними появляется возможность определения эффективности работы системы с использованием основных способов повышения надежности (изменения числа температур хладагента, резервирования, изменения конструкции элементов и т.п.) по условию

$$\min \sum_t \mathcal{Z}_t a_t, \quad \mathcal{Z}_t = \sum_i (K_i + K_{рез i}) + \int_x \mathcal{E}_x d\tau + \int_x C_{ущ x} d\tau.$$

где K_i , $K_{рез i}$ – капитальные затраты на рабочее и резервное оборудование;

$C_{ущ}$ – стоимость ущерба от простоя оборудования;

\mathcal{E} – эксплуатационные затраты в единицу времени.

Функции цели (ЧДД или \mathcal{Z}_t) выражаются в этом случае системой нелинейных и трансцендентных уравнений с большим числом ограничений и логических связей, поэтому данная задача составляет предмет нелинейного программирования. При решении задач параметрической оптимизации неплохо зарекомендовал себя метод скользящего допуска [21]. Для решения общей многоуровневой задачи структурно-параметрической оптимизации используются методы нелинейного, динамического и комбинированного программирования.

В зависимости от назначения, системы холодоснабжения могут рассматриваться как автономные энерготехнологические объекты и как объекты, входящие в состав производственно-технологических

предприятий различных отраслей промышленности. Как показывает анализ функциональных особенностей холодильных установок в процессе проектных исследований, в большинстве случаев указанное выше выделение систем холодоснабжения в процессе декомпозиции предприятий в самостоятельные объекты исследования оказывается возможным и рациональным при корректных координирующих взаимодействиях отдельных подразделений и проектных организаций.

Методологию структурно-параметрической оптимизации предлагается при этом базировать на совмещении принципов декомпозиции и композиции. Именно сочетание указанных принципов декомпозиции и композиции позволяет решать задачи координирования этапов структурной и параметрической оптимизации основного оборудования, а значит, и предопределяет саму возможность деления процесса оптимизации на отдельные этапы и объединения их в обобщенный алгоритм в режиме диалога. Использование регрессионных или имитационных моделей, описывающих фрагменты подсистем элементов и процессов, позволяет обеспечить соответствие критерия оптимальности на отдельном этапе общему условию оптимальности при структурной и параметрической оптимизации системы холодоснабжения в целом.

При этом в основу имитационных моделей отдельных комплексов или блоков могут входить результаты оптимизационных исследований объектов в виде регрессивных (имитационных) соотношений между входными и выходными переменными или параметрами. Соотношений в общем случае может быть несколько, так как они могут отражать разнообразные взаимосвязи как физических параметров, так и технико-экономических.

Сформулированная задача структурно-параметрической оптимизации является весьма сложной нелинейной задачей, а так как возникает необходимость оптимизировать состав оборудования, то указанная задача приобретает и комбинаторно-дискретный характер. Достаточно корректное решение может быть получено только при глубоком анализе специфики данной задачи и использовании методов многоуровневой оптимизации.

Обобщенный алгоритм структурно-параметрического синтеза холодильных установок предлагается формировать из нескольких скоординированных этапов [18]:

- выбор хладагентов и типа схемы;
- направленный поиск приближенной структуры и оптимального распределения потребителей холода и тепла по температурным уровням (или диапазонам) при использовании имитационного (регрессионного) моделирования теплообменного и компрессорного оборудования;
- эмпирико-эвристический последовательный синтез уточненных структур основного энергетического комплекса первой части каскада с

вариантами фиксированных множеств температур кипения хладагента на базе соотношений о степени воздействия изменения структуры на общую эффективность системы;

– структурно-параметрическая оптимизация контуров вспомогательного охлаждающего комплекса нижней ветви каскада с формированием их математических моделей;

– многоуровневая параметрическая оптимизация оборудования с совмещением принципов декомпозиции и композиции (при стягивании контуров вспомогательного комплекса в псевдовершины основного энергетического комплекса);

– формирование имитационных (регрессионных) моделей для нижней ветви каскада в виде зависимости критерия эффективности

$$Z'_c = f(T'_k, \Delta t_{к-и}),$$

где T'_k – температура конденсации в нижней ветви каскада;

$\Delta t_{к-и}$ – перепад температур в конденсаторе-испарителе;

– реализация этапов структурно-параметрического синтеза для верхней ветви каскада осуществляется аналогично, при этом нижняя ветвь каскада рассматривается в качестве выделенного потребителя холода верхней ветви каскада;

– корректировка структуры за счет оптимизации надежности холодильной установки как сложной функционально-логической схемы с помощью методов статистического моделирования.

Выбор хладагента и типа схемы осуществляется предварительно с использованием эмпирико-эвристических методов на базе анализа всей информации об объекте и конструкции охлаждающих устройств (обычно в режиме диалога). Распределение потребителей холода по изотермам осуществляется после достижения условия

$$\min \left\{ \sum_{t=0}^T \alpha_t \left\{ \left[\sum \sum \left(D_{Tij}^* \cdot \frac{1}{\eta_{ki}} + D_{\Gamma ij}^* \cdot \frac{1}{\eta_{hi}} \right) + \sum \left(D_{Tuj} \cdot \frac{1}{\eta_{ki}} + D_{\Gamma uj} \cdot \frac{1}{\eta_{hi}} \right) \right] \cdot \tau_{\Gamma} \times \right. \right. \\ \left. \left. \times c_{1э} + \sum_i \sum_j K_{ij} \right\} \right\},$$

где $D_{Tij}, D_{\Gamma ij}$ – тепловые и гидравлические потери эксергии в теплообменниках, испарителях и др. элементах системы;

K_{ij} – капитальные затраты на теплообменники, испарители и др. элементы системы.

В процессе синтеза каждая подсистема "вложенных" циркуляционных контуров (каждого температурного уровня) вспомогательного охлаждающего комплекса сводится к псевдовершине основного энергетического комплекса, имеющей математическое описание,

сформулированное при проведении оптимизационного исследования соответствующей подсистемы. Указанный подход дает возможность провести декомпозицию графового описания всей системы и значительно упростить его.

При графовом представлении структура систем холодоснабжения описывается ориентированным связным графом $G(N, M, \Gamma)$, состоящим из множества взаимосвязанных подграфов $G_{ij}(N_{ij}, M_{ij}, \Gamma_{ij})$, имеющих замкнутые "вложенные" контуры, причем

$$\forall G_{ij}(N_{ij}, M_{ij}, \Gamma_{ij}) \in B(G), (G_{ij} \neq 0), i \in I, j \in J$$

$$B(G) = \{B_1(G_{1j}), B_2(G_{2j})\},$$

$B_1(G_{1j}) = \{G_{11}, G_{12}, \dots\}$ – совокупность частей подграфа нижней ветви каскада;

$B_2(G_{2j}) = \{G_{21}, G_{22}, \dots\}$ – совокупность частей подграфа верхней ветви каскада;

$$G = \bigcup_{i=1}^2 \bigcup_{j_1=1}^m G_{ij}, N = \bigcup_{i=1}^2 \bigcup_{j_1=1}^m N_{ij},$$

где N – множество узлов G ; M – множество дуг G ; Γ – предикат G ;

i – количество ветвей каскада;

j_i – количество температурных уровней в i -той ветви каскада.

Принцип генерирования структуры согласно графовому описанию можно представить в следующем виде:

$$Z = F\left[\bigcup_{i=1}^2 \bigcup_{j_1=1}^m f(G_{ij}, N_{ij})\right].$$

Последовательное формирование структуры основного энергетического комплекса реализуется с помощью специального информационного графа, на котором вершины отображают типовые процедуры синтеза отдельных подсистем.

В процессе исследований осуществляется скоординированное воздействие на эффективность работы системы холодоснабжения как вспомогательного охлаждающего комплекса, так и основного энергетического комплекса. Причем в состав вспомогательного охлаждающего комплекса систем косвенного охлаждения (в качестве примера) входит:

- холодильно-технологическое оборудование камер;
- прямой и обратный трубопроводы для транспортировки хладоносителя;
- насосное и емкостное оборудование для хладоносителя;
- испарители для охлаждения потоков хладоносителя.

Расчет любого контура сводится к последовательному анализу выделенных подсистем (состоящих из определенных совокупностей

элементов, которые рассчитываются и исследуются только совместно) с формированием имитационных (регрессионных) моделей, используемых при исследовании подсистем более высокого уровня (на базе принципов композиции). Система холодоснабжения последовательно формируется в виде ориентированного связного потокового графа, математическая модель системы генерируется с помощью метода модульного программирования из заранее составленных математических моделей отдельных типовых элементов; решение общей системы уравнений осуществляется методом разрыва замкнутых контуров графа после охлаждающих устройств всех температурных уровней, что сводит систему контуров к эквивалентной разомкнутой системе, представленной в виде формального дерева связного графа.

При этом используется методика многоуровневой структурно-параметрической оптимизации, когда на каждом уровне как основных энергетических, так и вспомогательных комплексов предварительно формируются множества параметров оптимизации, влияющих на эффективность работы всей системы в целом.

Можно выделить следующие списки параметров оптимизации:

1) Расчетные параметры (для подбора оборудования) основного энергетического комплекса $x_{10}(t_{нд}^*, t_o^*, \Delta t_{min}^{*и}, \Delta t_k^*, \Delta t_{вк}^*)$;

2) Текущие внутренние параметры оптимизации (для анализа характеристик оборудования в процессе эксплуатации $x_{11}(t_{нд}, t_o, \Delta t_{min}^{и}, \Delta t_k, \Delta t_{вк})$;

3) Расчетные параметры (для подбора оборудования) вспомогательных охлаждающих комплексов $x_{20}(\Delta t_{sij}^*, \Delta t_{bij}^*, W_{sij}^*, W_{bij}^{BO}, W_{ij}^{TP}, W_{su}^*)$;

4) Текущие внутренние параметры оптимизации вспомогательных охлаждающих комплексов $x_{21}(\Delta t_{si}, \Delta t_{bij}, W_{si}, W_{bi}, W_{sj}^u, W_{ij}^{TP})$.

Основные параметры, определяющие эффективность как вспомогательных комплексов, так и всей системы, представлены на рисунке 4.4.

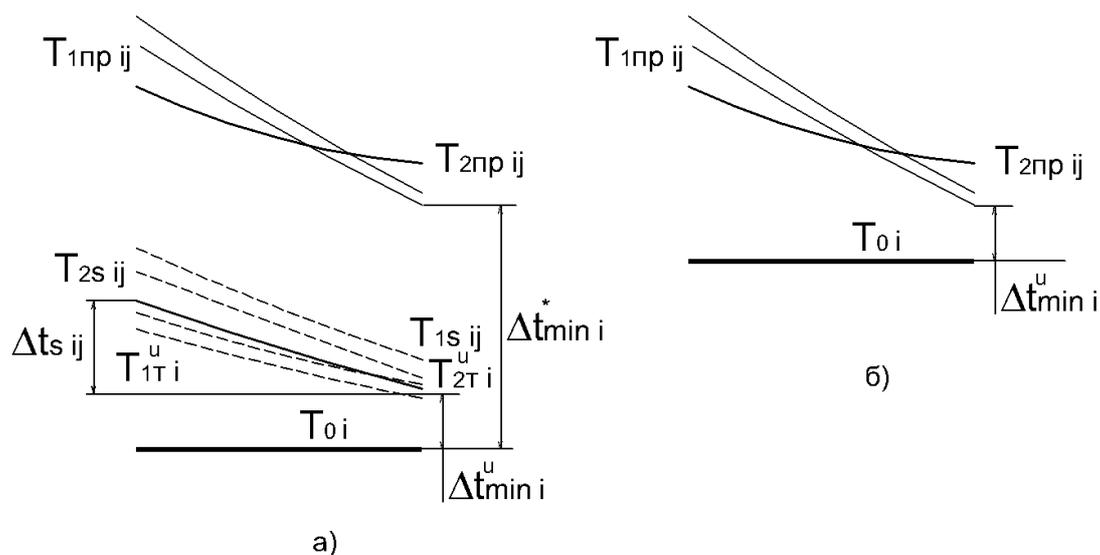


Рисунок 4.4. Параметры, определяющие эффективность вспомогательных комплексов и всей системы: а) перепады температур во вспомогательном охлаждающем комплексе системы с промежуточным хладоносителем; б) перепады температур во вспомогательном охлаждающем комплексе системы непосредственного охлаждения.

Использование части указанных параметров первого уровня (параметров связи) в качестве параметров "закрепления" при локальной оптимизации каждой j -ой подсистемы вспомогательного комплекса позволяет формировать соответствующие математические описания в виде зависимостей основных теплотехнических и технико-экономических характеристик от указанных параметров связи в виде регрессионных и имитационных моделей.

Приведенные затраты на вспомогательный охлаждающий комплекс складываются из затрат на его отдельные составляющие. Расчет и выбор оборудования базируются на расчетных параметрах оптимизации Δt_{sj}^* , Δt_{vi}^* , W_{sj}^* , W_{vi}^* , $W_{тр}^*$, W_{sj}^{*u} . При этом эксплуатационные затраты формируются по результатам локальной оптимизации по текущим внутренним параметрам оптимизации Δt_{sij} , Δt_{vij} , W_{sij}^{BO} , W_{vij}^{BO} , W_{ij}^{TP} , W_{sj}^u . Использование разработанного алгоритма формирования математической модели контура в виде регрессионных уравнений, отражающих зависимость массовых расходов основных потоков (хладоносителя, воздуха) и технико-экономических показателей (капитальных затрат, годовых эксплуатационных затрат, приведённых затрат, общих годовых затрат и др.) от основных расчетных параметров связи T_o^* , $T_{нд}^*$, Δt_{min}^{u*} , позволяет упростить задачу оптимального проектирования всей системы холодоснабжения [24].

Соотношения для основных технико-экономических показателей ВОК i -го температурного уровня можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned} & \text{ПЗ}_i^{\text{ВОК}}(T_{\text{нд}i}^*, T_{oi}^*, \Delta t_{\text{mini}}^*) = \\ & = \min \sum_j \text{ПЗ}_{ij}(\Delta t_{sij}, \Delta t_{sij}^*, \Delta t_{vij}^*, \Delta t_{vij}, W_{sij}^*, W_{vij}) \\ & + \min \sum_j \text{ПЗ}_{tij}(W_{tij}) + \min \text{ПЗ}_и(W_{исi}); \end{aligned}$$

$$\text{ПЗ}_i^{\text{ВОК}} = \frac{K_i^{\text{ВОК}}}{T} + \mathcal{E}_i^{\text{ВОК}};$$

$$G_{si}^* = f(T_{\text{нд}i}^*, T_{oi}^*, \Delta t_{\text{mini}}^*, \Delta t_{sij}^*).$$

Соотношения для капитальных и эксплуатационных затрат формируются в процессе локальных оптимизационных исследований.

Структурно-параметрическая оптимизация трубопроводных подсистем [23, 24] сводится к достижению условия

$$\min \mathcal{Z}_{\text{тр}}(\Gamma, W, q),$$

где Γ – структурный параметр, характеризующий схему трассировки трубопроводов; W, q – векторы скорости хладоносителя в трубах и плотности теплового потока через изоляцию трубопроводов.

Структурная оптимизация трубопроводов успешно решается путем приведения ее к модифицированной задаче Штейнера [24]. Параметрическая оптимизация разветвленных трубопроводов решается с использованием методов динамического программирования. Параметрическая оптимизация каскадной холодильной установки сводится к достижению условия

$$\begin{aligned} \min \mathcal{Z}(H, X, U) &= \min[\mathcal{Z}^I + \mathcal{Z}^{II}] = \min[\mathcal{Z}_{\text{эк}}^I + \sum_i^{m_I} \mathcal{Z}_{\text{ок}i}^{II} + \mathcal{Z}_{\text{эк}}^{II} + \sum_{i=m_I+1}^{m_{II}} \mathcal{Z}_{\text{ок}i}^{II}] = \\ &= \min[\mathcal{Z}^I(T_{\kappa}^I, \Delta t_{\kappa-u}) + \mathcal{Z}_{\text{эк}}^{II}(X, U) + \sum_{i=m_I+1}^{m_{II}} \mathcal{Z}_{\text{ок}i}^{II}(T_{oi}, T_{\text{нд}i}, \Delta t_{\text{min}i})]. \end{aligned}$$

Блок-схема процедуры формирования математических моделей вспомогательного охлаждающего комплекса приведена на рисунке 4.5.

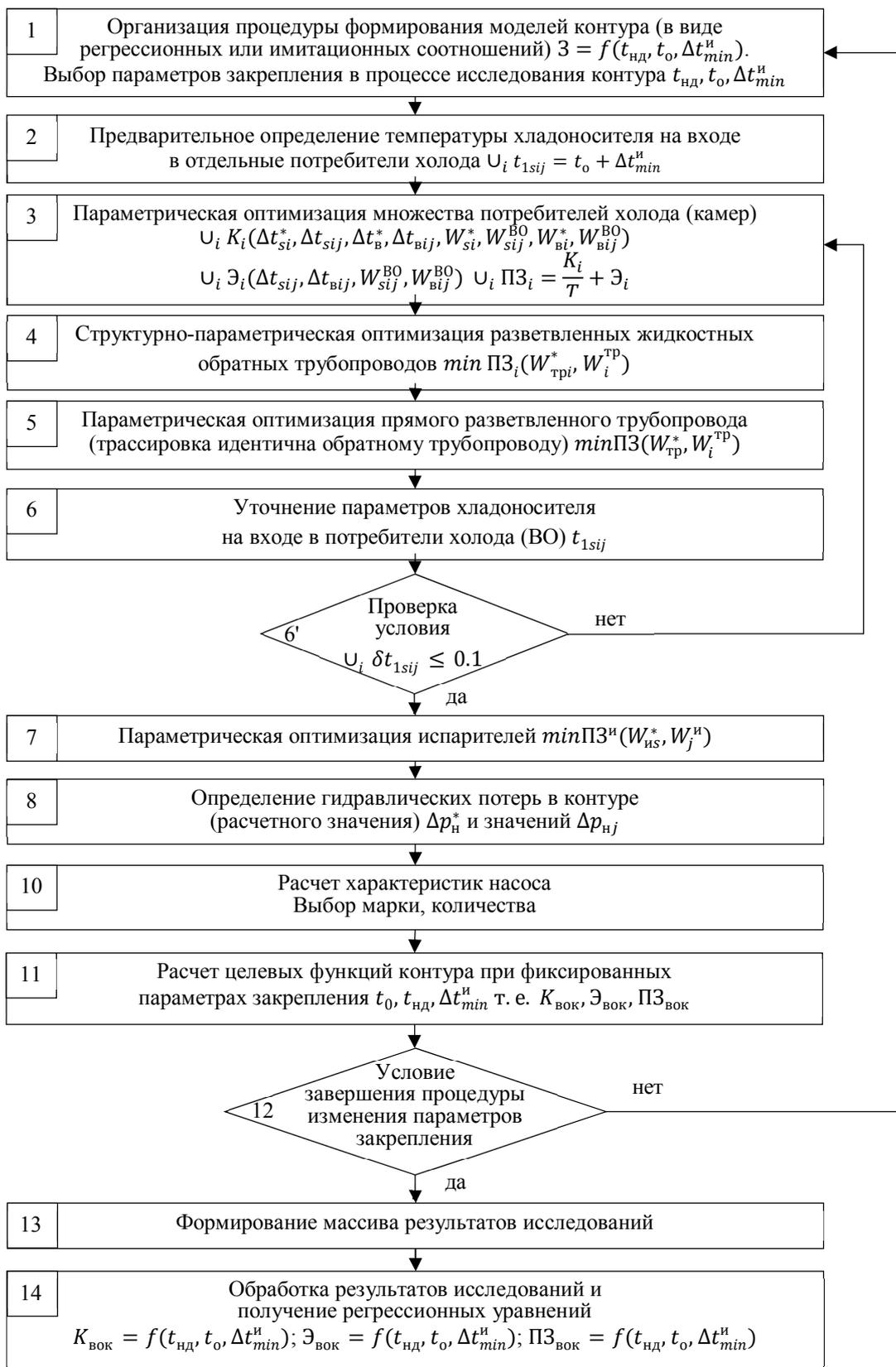


Рисунок 4.5 – Блок-схема процедуры формирования математических моделей вспомогательного охлаждающего комплекса с промежуточным хладоносителем

Основные параметры вспомогательных охлаждающих комплексов систем косвенного охлаждения при фиксированных параметрах "закрепления" $t_{ндi}$, t_{oi} , $\Delta t_{\min i}$ определяются в ходе локальных оптимизационных исследований отдельных составляющих комплексов: – множества воздухоохладителей камер (потребителей холода) i -го температурного уровня:

$$\begin{aligned}
t_{2si}^n &= t_{oi} + \Delta t_{\min i}^n; t_{1sij} = t_{2si}^n + \Delta t_{ij}^{\text{TP}}; \\
t_{2sij} &= t_{1sij} + \Delta t_{sij}; \Delta \bar{t}_i^{\text{TP}} = A_{\text{TP}} \cdot Re_{\text{T}}^{n1} \cdot \lambda_{\text{u3}}^{n2} \cdot \Delta T_{Ti}^{n3}; \\
l_{ij} &= |X_{\text{HC}} - X_{ij}| + |Y_{\text{HC}} - Y_{ij}| + |Z_{\text{HC}} - Z_{ij}|; \\
\Delta t_{ij}^{\text{TP}} &= \Delta \bar{t}_i^{\text{TP}} \cdot l_{ij}; Q_i^{\text{TP}} = 2 \sum_{j=1}^n G_{sij} \cdot c_{psi} \cdot \Delta t_{ij}^{\text{TP}}; \\
G_{sij} &= \frac{Q_{Tij}}{[c_{psi} \cdot (t_{2sij} - t_{1sij})]} = \frac{Q_{Tij}}{c_{psi} \cdot \Delta t_{sij}}; G_{si} = \sum_{j=1}^n G_{sij}; \\
Q_{oi} &= \sum_{i=1}^n Q_{Tij} + Q_i^{\text{TP}}; G_s = \sum_{j=1}^n G_{sij}; t_{1si}^n = t_{2si}^n + \frac{Q_{oi}}{G_{si} \cdot c_{si}}; \\
G_{bij} &= \frac{Q_{Tij}}{c_{pbi} \cdot \Delta t_{bij}}; t_{2bij} = t_{1bij} - \Delta t_{bij}; \\
\alpha_{sij} &= f(W_{sij}, \Gamma_{sij}); \alpha_{bij} = f(W_{bij}, \Gamma_{bij}); \\
K_{ij}^{\text{BO}} &= \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{sij}} + R_{ij} + \frac{1}{\alpha_{bij}}}; \theta_{ij}^{\text{BO}} = \frac{(t_{2bij} - t_{1sij}) - (t_{1bij} - t_{2sij})}{\ln \frac{t_{2bij} - t_{1sij}}{t_{1bij} - t_{2sij}}}; \\
F_{ij}^{\text{BO}} &= \frac{Q_{Tij}}{(K_{ij}^{\text{BO}} \cdot \theta_{ij}^{\text{BO}})}; C_{Fij}^{\text{BO}} = C_{1F}^{\text{BO}} \cdot F_{ij}^{\text{BO}} \cdot K_{\text{арм}}^{\text{BO}}; C_{Fi}^{\text{BO}} = \sum_{j=1}^n C_{Fij}^{\text{BO}}; \\
\Delta p_{sij}^{\text{BO}} &= f(W_{sij}^{\text{BO}}, \Gamma_{sij}^{\text{BO}}); \Delta p_{bij}^{\text{BO}} = f(W_{bij}^{\text{BO}}, \Gamma_{bij}^{\text{BO}}); \\
N_{\text{вент } ij}^* &= \frac{\Delta p_{bij}^{\text{BO}} \cdot G_{bij}}{\rho_{bij} \cdot \eta_{\text{вент}}^*}; \bar{N}_{\text{вент } ij} = \frac{N_{\text{вент } ij}^{\text{BO}}}{N_{\text{эб } ij}}; \eta_{\text{вент } ij} = f(\bar{N}_{\text{вент } ij}); \\
N_{\text{вент } ij}^{\text{BO}} &= N_{\text{вент } ij}^* \cdot \frac{\eta_{\text{вент}}^*}{\eta_{\text{вент } ij}}; N_{sij}^{\text{BO}} = \frac{\Delta p_{sij}^{\text{BO}} \cdot G_{sij}}{\rho_{sij} \cdot \eta_{\text{H}}^*}; \\
\Xi_{ij}^{\text{BO}} &= (N_{\text{вент } ij}^{\text{BO}} + N_{sij}^{\text{BO}}) \cdot C_{1\text{э}} \cdot \tau; N_{\text{вент } i}^{\text{BO}} = \sum_{j=1}^n N_{\text{вент } ij}^{\text{BO}};
\end{aligned}$$

$$\min \left[\text{ПЗ}_{ij}^{\text{BO}}(\Delta t_{sij}, W_{sij}^{\text{BO}}, W_{bij}^{\text{BO}}, \Gamma_{sij}^{\text{BO}}, \Gamma_{bij}^{\text{BO}}) = \frac{C_{Fij}^{\text{BO}}}{T} + \mathfrak{E}_{ij}^{\text{BO}} \right]; \quad \mathfrak{E}_i^{\text{BO}} = \sum_{j=1}^n \mathfrak{E}_{ij}^{\text{BO}}.$$

– испарителя:

$$\begin{aligned} \alpha_{si}^{\text{H}} &= f(W_{si}^{\text{H}}, \Gamma_{si}^{\text{H}}); \quad \alpha_{oi}^{\text{H}} = f(q_{oi}^{\text{H}}, \Gamma_{oi}^{\text{H}}); \\ k_i^{\text{H}} &= f(\alpha_{si}^{\text{H}}, \alpha_{oi}^{\text{H}}); \quad q_{oi}^{\text{H}} = k_i^{\text{H}} \cdot \theta_i^{\text{H}}; \\ t_{2s}^{\text{H}} &= t_{oi} + \Delta t_{\min i}^{\text{H}}; \quad \theta_i^{\text{H}} = \frac{t_{1si}^{\text{H}} - t_{2si}^{\text{H}}}{\ln \frac{t_{1si}^{\text{H}} - t_{oi}}{t_{2si}^{\text{H}} - t_{oi}}}; \\ F_i^{\text{H}} &= \frac{Q_{oi}}{q_{oi}^{\text{H}}}; \quad C_{Fi}^{\text{H}} = C_{1F}^{\text{H}} \cdot F_i^{\text{H}} \cdot K_{\text{арм}}^{\text{H}}; \\ \Delta p_{si}^{\text{H}} &= f(W_{si}^{\text{H}}, \Gamma_{si}^{\text{H}}) = f(Re_{si}^{\text{H}}, \Gamma_{si}^{\text{H}}); \\ \mathfrak{E}_i^{\text{H}} &= \frac{\Delta p_{si}^{\text{H}} \cdot G_{si}}{\rho_{si} \cdot \eta_{\text{H}}^*} \cdot C_{1\mathfrak{E}} \cdot \tau = N_{\text{Hi}}^{\text{H}} \cdot C_{1\mathfrak{E}} \cdot \tau; \\ \text{ПЗ}_i^{\text{H}} &= \frac{C_{Fi}^{\text{H}}}{T} + \mathfrak{E}_i^{\text{H}}; \quad \min[\text{ПЗ}_i^{\text{H}}(W_{si}^{\text{H}}, \Gamma_{si}^{\text{H}}, \Gamma_{oi}^{\text{H}})]; \end{aligned}$$

– трубопроводов (включая подсистему "насосы-емкостное оборудование"):

$$\begin{aligned} \Delta T_{\text{Ti}} &= T_{\text{oc}} - T_{oi} - \Delta t_{\min i}^{\text{H}}; \quad \Delta \bar{t}_{ij}^{\text{TP}} = A_{\text{TP}} \cdot Re_{\text{T}}^{n1} \cdot \lambda_{\text{из}}^{n2} \cdot \Delta T_{\text{Ti}}^{n3}; \\ \bar{C}_{ij}^{\text{TP}} &= f(W_{sij}^{\text{TP}}, C_{1\text{из}}, \lambda_{\text{из}}, \Delta T_{\text{Ti}}); \quad W_{sij}^{\text{TP}} = W_{si}^{\text{TP}}; \\ C_i^{\text{TP}} &= A_{\text{TP}} \cdot \sum_{j=1}^n C_{ij}^{\text{TP}} = A_{\text{TP}} \cdot \sum_{j=1}^n \bar{C}_{ij}^{\text{TP}} \cdot l_{ij}; \quad A_{\text{TP}} - \text{коэффициент пересчета}; \\ \Delta \bar{p}_{sij}^{\text{TP}} &= f(Re_{sij}^{\text{TP}}, \Gamma_{sij}^{\text{TP}}); \quad \Delta p_{sij}^{\text{TP}} = \sum_{j=1}^n \Delta \bar{p}_{sij}^{\text{TP}} \cdot l_{ij}; \\ \mathfrak{E}_{ij}^{\text{TP}} &= 2 \cdot \frac{\Delta p_{si}^{\text{TP}} \cdot G_{si}}{\rho_{si} \cdot \eta_{\text{H}}^*} \cdot C_{1\mathfrak{E}} \cdot \tau; \quad \mathfrak{E}_i^{\text{TP}} = B_{\text{TP}} \cdot \sum_{j=1}^n \mathfrak{E}_{ij}^{\text{TP}}; \\ N_{si}^{\text{TP}} &= \sum_{j=1}^n \frac{\Delta p_{si}^{\text{TP}} \cdot G_{si}}{\rho_{si} \cdot \eta_{\text{H}}^*}; \quad N_{\text{Hi}} = N_{\text{Hi}}^{\text{H}} + N_{si}^{\text{BO}} + N_{si}^{\text{TP}}; \\ C_i^{\text{H-e}} &= f(V_c, G_{si}, \rho_{si}, N_{\text{Hi}}); \\ \text{ПЗ}_i^{\text{TP}} &= \frac{C_i^{\text{TP}} + C_i^{\text{H-e}}}{T} + \mathfrak{E}_i^{\text{TP}}; \quad \min[\text{ПЗ}_i^{\text{TP}}(W_{si}^{\text{TP}}, \Gamma_i^{\text{TP}})]. \end{aligned}$$

В результате формируются регрессионные соотношения, связывающие основные технико-экономические показатели и параметры

"закрепления" (параметры оптимизации верхнего уровня), которые используются при оптимизации основного энергетического комплекса и всей системы холодоснабжения:

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_i^{\text{ВОК}} &= \mathcal{E}_i^{\text{ВО}} + \mathcal{E}_i^{\text{ТР}} + \mathcal{E}_i^{\text{И}} = f(t_{\text{нд}i}, t_{\text{oi}}, t_{\text{min}i}); \\ K_i^{\text{ВОК}} &= K_{\text{ам}} \cdot (C_{Fi}^{\text{ВО}} + C_i^{\text{ТР}} + C_{Fi}^{\text{И}} + C_i^{\text{H-e}}) = f(t_{\text{нд}i}, t_{\text{oi}}, t_{\text{min}i}); \\ \text{ПЗ}_i^{\text{ВОК}} &= \frac{K_i^{\text{ВОК}}}{T} + \mathcal{E}_i^{\text{ВОК}} = f(t_{\text{нд}i}, t_{\text{oi}}, t_{\text{min}i}). \end{aligned}$$

При совмещении принципов композиции и декомпозиции появляется возможность оптимизации сложных объектов с большим количеством потребителей холода. Использование упрощенных математических моделей вспомогательных комплексов позволяет формировать общее математическое описание всей холодильной установки. Оптимизационное исследование системы в процессе эксплуатации дает возможность корректно обосновать выбор того или иного оборудования с учетом эффективности адаптивного управления.

Соотношения для основных технико-экономических показателей ОЭК+ВОК бескасадного исполнения холодильной установки могут быть приведены в следующем виде:

$$\begin{aligned} &\text{ПЗ}^{\text{ОЭК+ВОК}}(t_{\text{нд}}^*, t_0^*, \Delta t_{\text{min}}^{*\text{И}}, \Delta t_{\text{к}}^*, \Delta t_{\text{вк}}^*) = \\ &= \text{ПЗ}^{\text{ВОК}}(t_{\text{нд}}^*, t_0^*, \Delta t_{\text{min}}^{*\text{И}}) + \text{ПЗ}^{\text{КМ}}(t_{\text{нд}}^*, t_0^*, \Delta t_{\text{к}}^*) + \text{ПЗ}^{\text{КД}}(\Delta t_{\text{к}}^*, \Delta t_{\text{вк}}^*) \\ &\quad K^{\text{ОЭК+ВОК}}(t_{\text{нд}}^*, t_0^*, \Delta t_{\text{min}}^{*\text{И}}, \Delta t_{\text{к}}^*, \Delta t_{\text{вк}}^*) \\ &= K^{\text{ВОК}}(t_{\text{нд}}^*, t_0^*, \Delta t_{\text{min}}^{*\text{И}}) + K^{\text{КН}}(t_{\text{нд}}^*, t_0^*, \Delta t_{\text{к}}^*) + K^{\text{НД}}(\Delta t_{\text{к}}^*, \Delta t_{\text{вк}}^*) \\ &\quad \mathcal{E}^{\text{ОЭК+ВОК}}(t_{\text{нд}}^*, t_0^*, \Delta t_{\text{min}}^{*\text{И}}, \Delta t_{\text{к}}^*, \Delta t_{\text{вк}}^*) \\ &= \mathcal{E}^{\text{ВОК}}(t_{\text{нд}}^*, t_0^*, \Delta t_{\text{min}}^{*\text{И}}) + \mathcal{E}^{\text{КМ}}(t_{\text{нд}}^*, t_0^*, \Delta t_{\text{к}}^*) + \mathcal{E}^{\text{КД}}(\Delta t_{\text{к}}^*, \Delta t_{\text{вк}}^*) \end{aligned}$$

Блок-схема процедуры оптимизации системы холодоснабжения приведена на рисунке 4.6.

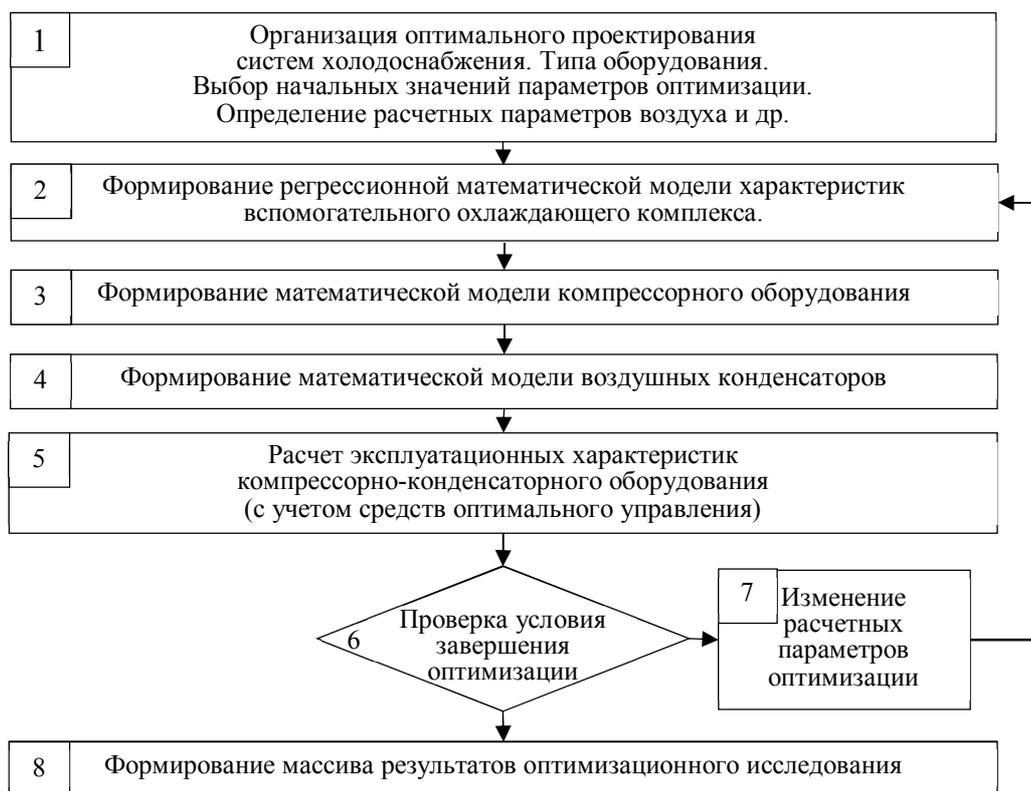


Рисунок 4.6 – Блок-схема алгоритма формирования процедуры оптимизации системы холодоснабжения.

Параметры основного энергетического комплекса с учетом климатических условий и параметров оптимизации:

$$\begin{aligned}
 t_{\text{к}}^* &= t_{\text{вп}} + \Delta t_{\text{к}}^*; & t_{\text{в2}}^* &= t_{\text{вп}} + \Delta t_{\text{вк}}^*; \\
 t_{\text{к}} &= t_{\text{в}} + \Delta t_{\text{к}}^{\text{max}}; & t_{\text{в2}} &= t_{\text{в}} + \Delta t_{\text{вк}}; \\
 G_{\text{в}} &= \frac{Q_{\text{к}}}{(C_{\text{рв}} \cdot \Delta t_{\text{вк}})}; & G_0 &= \frac{Q_0 \cdot K_{\text{т}}}{q_0}; \\
 Q_{\text{к}} &= Q_0 + N_{\text{в}} \cdot \eta_{\text{мех}} \pm Q_{\text{м0}} \pm Q_{\text{ос}}; \\
 p_0 &= f(t_0); & p_{\text{к}} &= f(t_{\text{к}}); \\
 p_2 &= p_{\text{к}} + \Delta p_{\text{нагн}}^*; & p_1 &= p_0 - \Delta p_{\text{вс}}^*; \\
 \pi_{\text{к}} &= \frac{p_2}{p_1}; & G_{\text{а}} &= \frac{Q_0}{q_0}; & t_1 &= t_0 + \Delta t_{\text{вс}}; \\
 t_{2\text{с}} &= (t_1 + 273,15) \cdot \Pi_{\text{к}}^{\frac{\text{к}-1}{\text{к}}} - 273,15; \\
 \overline{q_{\text{м}}} &= \frac{G_{\text{м}}}{G_{\text{а}}} = a_{\text{м}} + v_{\text{м}} \cdot \pi_{\text{к}}; & \text{заданная } t_2 &\cong t_{2\text{с}}; \\
 \Delta t_{\text{м}} &= t_2 - t_{1\text{м}} - \Delta t_{\text{мп}}^*;
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Q_{MO} &= G_a \cdot \bar{q}_M \cdot C_M \cdot \Delta t_M; Q_{OC} = 0,06Q_{MO}; \\
\lambda &= f(\pi_K) = \sum_{i=1}^n a_i \cdot \Pi_K^i; V_1 = \lambda \cdot V_T; V = \frac{G_a}{\rho_1}; \\
\bar{V} &= \frac{G_a}{(\rho_1 \cdot V_1 \cdot n_K)}; \bar{N} = a_N + B_N \cdot \bar{V} + C_N \cdot \bar{V}^2; \\
\eta_e &= \sum \sum B_{ij} \cdot \pi_K^i \cdot \bar{t}^j; \\
N_e &= V \cdot \rho_1 \cdot \frac{\Delta i_s}{\eta_e}; \Delta i_s = i_{2s} - i_1; \\
N_{\text{эл}} &= \frac{N_i}{(\eta_e \cdot \eta_{\text{мех}})} = \frac{N_e}{\eta_{\text{эд}}}; \\
\eta_{\text{эд}} &= f(\bar{N}) = \sum_{i=1}^n B_1 \cdot \bar{N}^i; \\
\mathcal{E}_{\text{км}} &= N_{\text{эл}} \cdot \tau \cdot C_{i\mathcal{E}}; \\
V_{\text{вк}} &= \frac{G_B}{\rho_B}; \\
N_{\text{вк}} &= V_{\text{вк}} \cdot \frac{\Delta p_{\text{вк}}}{\eta_{\text{вент}}}; \\
\mathcal{E}_{\text{вк}} &= N_{\text{вк}} \cdot \tau \cdot C_{i\mathcal{E}}; \\
\mathcal{E}_{\text{оэк}} &= \mathcal{E}_{\text{км}} + \mathcal{E}_{\text{вк}}. \\
Q_K &= G_a \cdot (i_2 - i_4) = G_B \cdot C_{p1} \cdot \Delta t_{\text{вк}} = K_{\text{кг}} \cdot F_{\text{кг}} \cdot \theta_{\text{кг}}. \\
K_{\text{кд}} &= \frac{1}{\frac{1}{\alpha_B} + R_{\text{кд}} + \frac{1}{\alpha_{\text{кд}}}}; \theta_{\text{кг}} = \frac{t_{\text{в2}}^{\text{кд}} - t_{\text{в1}}^{\text{кд}}}{\ln \frac{t_{\text{к}} - t_{\text{в1}}^{\text{кд}}}{t_{\text{к}} - t_{\text{в2}}^{\text{кд}}}}; \\
C_F^{\text{кд}} &= C_{1F}^{\text{кд}} \cdot F_{\text{кд}}; K_{\text{оэк}} = (C_F^{\text{кд}} + C_{\text{км}}) \cdot C_a; \\
\text{ПЗ}_{\text{оэк}} &= \frac{K_{\text{оэк}}}{T} + \mathcal{E}_{\text{оэк}}.
\end{aligned}$$

При проектировании каскадных холодильных установок математические модели, полученные по результатам оптимизационных исследований нижней ветви каскада при фиксированном множестве закрепленных параметров $T_{\text{к}}^I$ и $\Delta t_{\text{к-и}}$ и вспомогательных охлаждающих контуров верхней ветви каскада, используются при оптимизации всей системы в целом (см. рисунок 4.7).

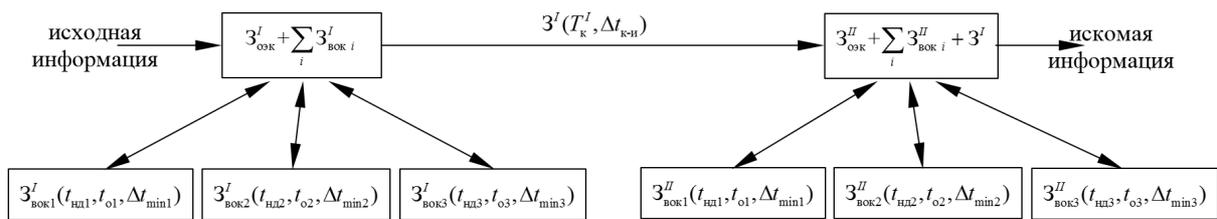


Рисунок 4.7 – Совмещение принципов декомпозиции и композиции при проектировании каскадной холодильной установки

Структура подсистемы, предназначенной для реализации автоматизированного проектирования холодильных систем, может быть представлена согласно рисунку 4.8 [26].

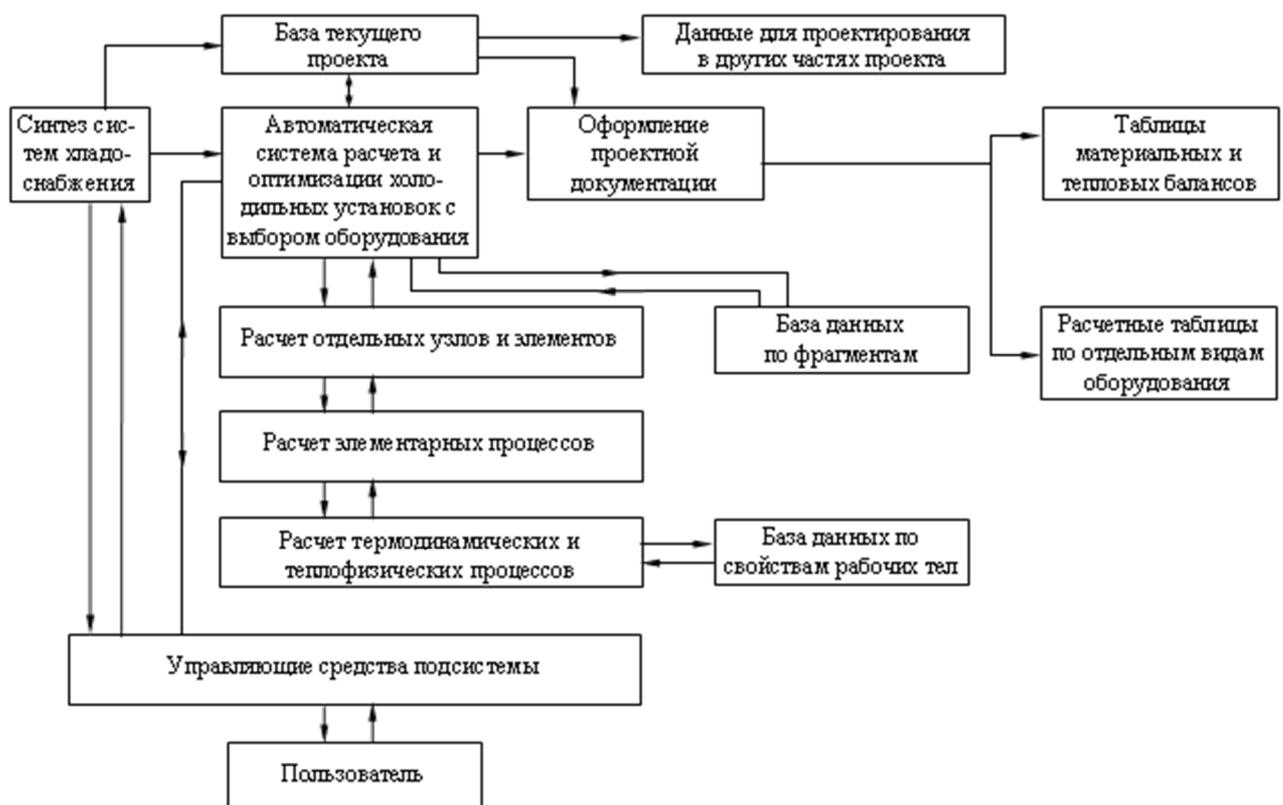


Рисунок 4.8 – Структура САПР систем холодоснабжения

Опыт проведения проектных исследований турбокомпрессорных холодильных установок для предприятий по переработке нефти и газа подтверждает эффективность использования методов оптимального проектирования, возможность сравнительных оценок эффективности использования различного оборудования, хладагентов и т. д. (см. рисунок 4.9).

Разработка математического и программного обеспечения, методов структурно-параметрической оптимизации обеспечивает возможность реализации предпроектных и проектных исследований холодильных систем предприятий нефтехимической, нефтеперерабатывающей, пищевой и др. отраслей промышленности.

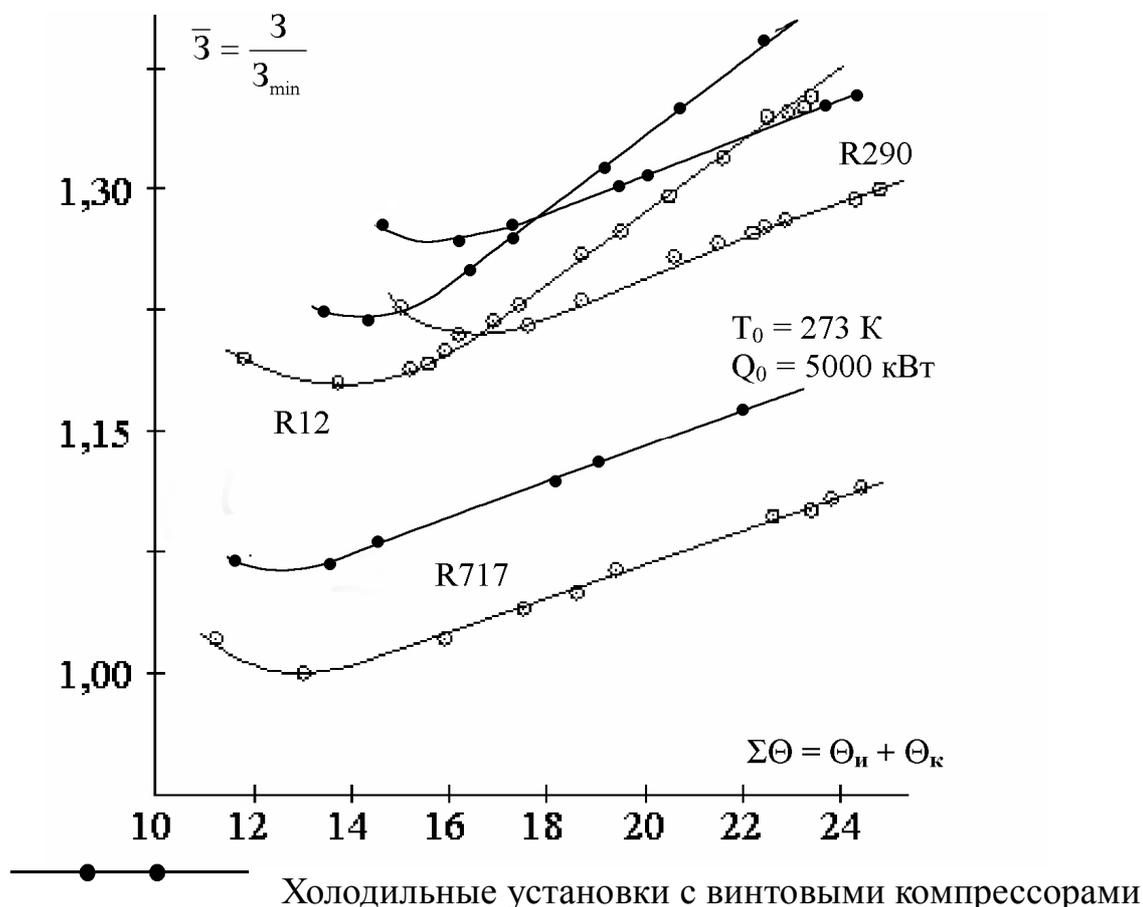


Рисунок 4.9 – Сравнительный анализ результатов оптимизационных предпроектных исследований турбокомпрессорных холодильных установок

Контрольные вопросы и задания

1. Определите понятие структурной оптимизации.
2. Определите понятие параметрической оптимизации.
3. Исходная информация при реализации процессов проектирования.

Графики изменения тепловых нагрузок.

4. Методы оптимизации целевой функции.
5. Алгоритм структурно-параметрического синтеза холодильных установок.

6. Список основных параметров оптимизации систем холодоснабжения.
7. Описание процедуры формирования математической модели вспомогательного охлаждающего комплекса.
8. Основные положения структурно-параметрической оптимизации трубопроводных подсистем.
9. Алгоритм формирования процедуры оптимизации системы холодоснабжения.
10. Сравнительный анализ результатов предпроектных исследований.

5 ПРАКТИЧЕСКИЕ ПРИМЕРЫ РАСЧЕТОВ И ПОДБОРА ОТДЕЛЬНЫХ ВИДОВ ХОЛОДИЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ И ТРУБОПРОВОДОВ

Для решения практических задач по расчету и подбору оборудования используются программные продукты фирм-производителей холодильного оборудования, которые находятся в открытом доступе.

5.1 Расчеты холодильных циклов

Методические аспекты расчетов простейших холодильных циклов приведены в работах [27, 28, 29].

Схемы наиболее распространенных и чаще используемых в практике проектирования циклов приведены на рисунках 5.1.1-5.1.5.

В данном разделе предлагается программа расчета холодильных циклов *CoolPack*, разработанная *IPU & Department of Mechanical Engineering Technical University of Denmark* [31].

Для пользователя предлагается шаблон для ввода исходных данных и результаты расчетов в виде $p-i$ диаграммы, таблицы со значениями параметров хладагента в узловых точках цикла, значения холодильного коэффициента и другие параметры (рисунок 5.1.6).

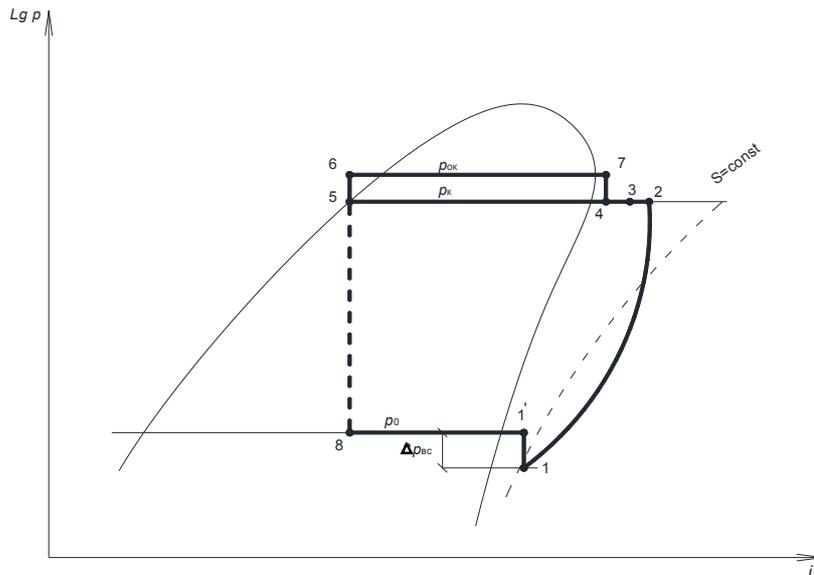


Рисунок 5.1.1 – Холодильный цикл с термосифонным охлаждением масла в $p-i$ диаграмме состояния: 1-2 – процесс сжатия; 2-3 – охлаждение за счёт смешения потоков т. 2 и т. 4; 3-5 – охлаждение и конденсация хладагента; 6-7 – кипение хладагента в маслоохладителе; т. 6 – параметры переохлаждённой жидкости перед маслоохладителем (после приоритетного ресивера); 5-8 – дросселирование жидкости до давления кипения в испарителе; 8-1' – кипение хладагента в испарителе; 1'-1 – падение давления во всасывающем трубопроводе.

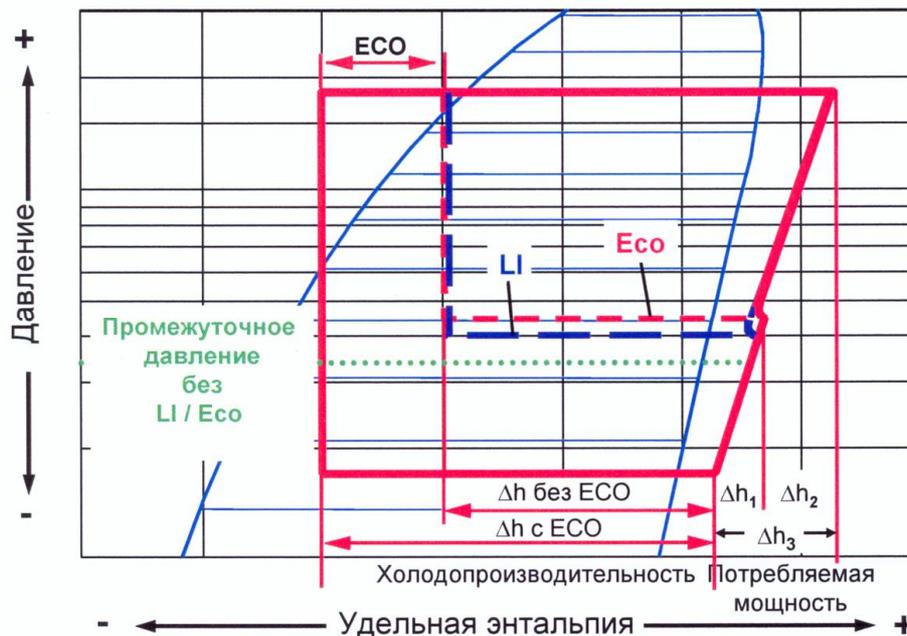


Рисунок 5.1.2 – Холодильные циклы с экономайзером Холодильные циклы с экономайзером (ECO) и впрыском жидкости (LI)

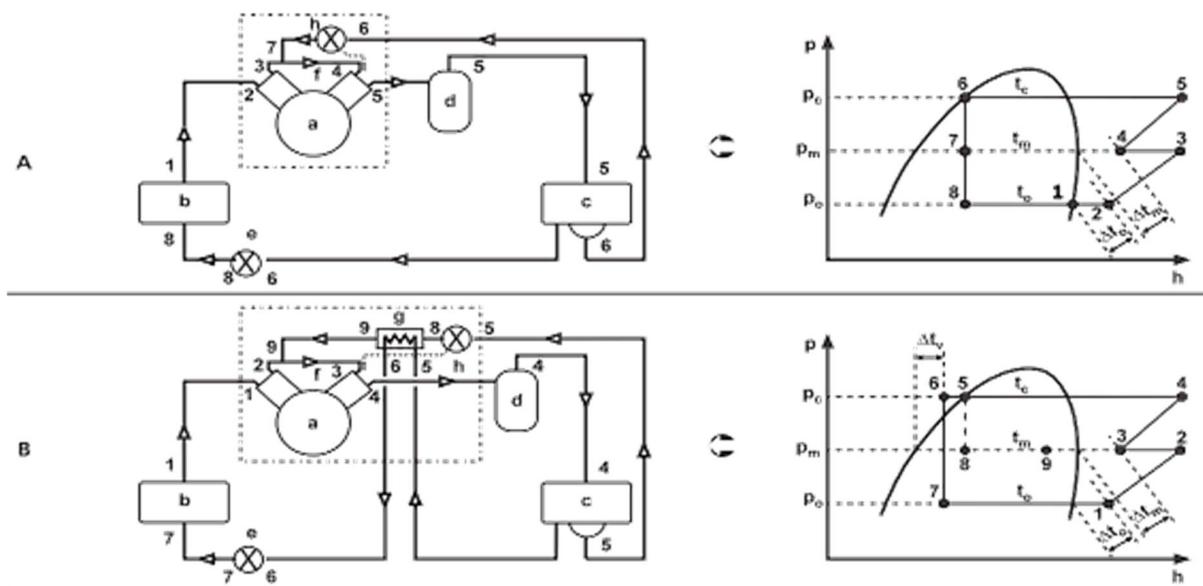


Рисунок 5.1.3 – Холодильные циклы с промежуточным впрыском хладагента, двухступенчатое сжатие

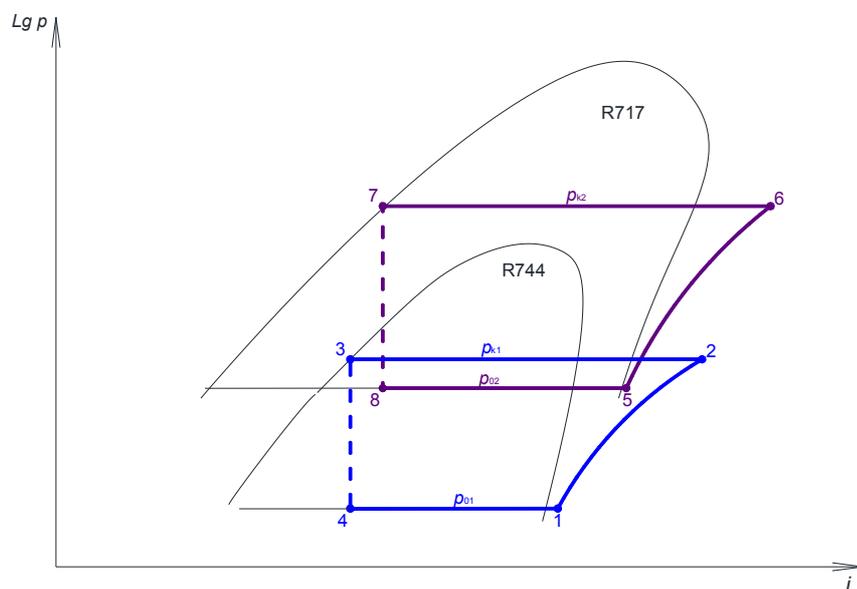


Рисунок 5.1.4 – Каскадный холодильный цикл. Нижняя ветвь каскада на CO_2 , верхняя ветвь каскада на NH_3

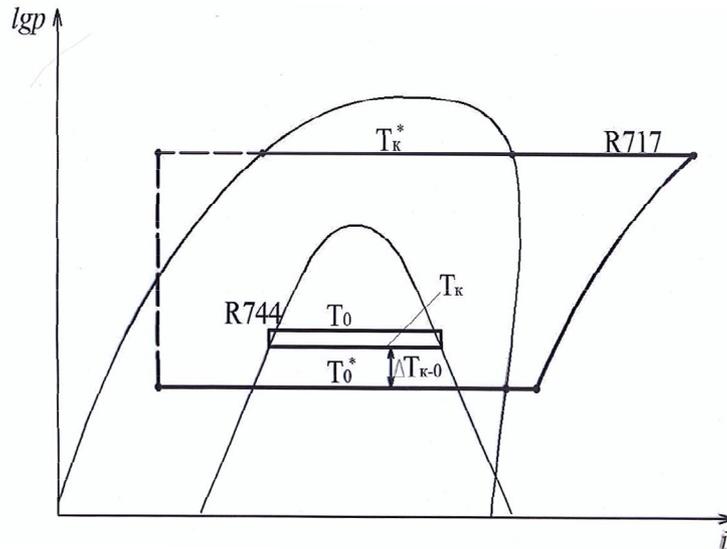


Рисунок 5.1.5 – Совмещённые циклы обратный (R717) и прямой (R744)

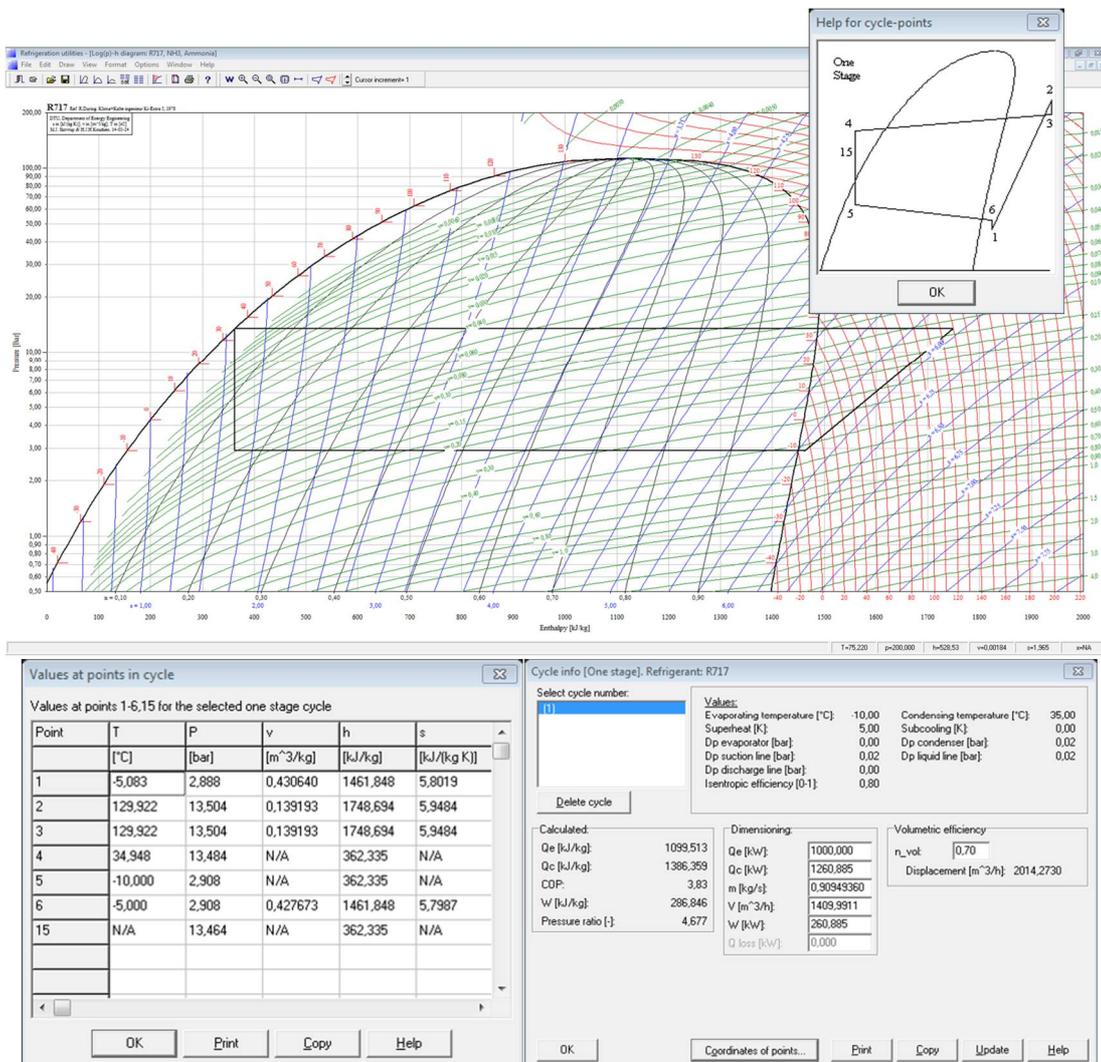


Рисунок 5.1.6 – Расчет холодильного цикла в программе CoolPack

5.2 Расчет и подбор компрессорного оборудования

Эффективность использования того или иного типа компрессоров и способа его регулирования должна определяться в результате технико-экономического анализа с учетом значений Q_o , t_o и t_k [27]. Разрезы отдельных видов компрессорного оборудования приведены на рисунках 5.2.1-5.2.3. Индикаторные диаграммы поршневых и винтовых компрессоров приведены на рисунках 5.2.4-5.2.5. Эффективность частотного регулирования винтовых компрессоров иллюстрируется с помощью рисунка 5.2.6.

На примере программы [32], разработанной фирмой *Bitzer* (Германия), показан расчет и подбор холодильных компрессоров. Для пользователя приведен шаблон с исходными данными, по завершении работы программы выводятся результаты расчета и подбора оборудования, основные характеристики (см. рисунки 5.2.7 – 5.2.9).

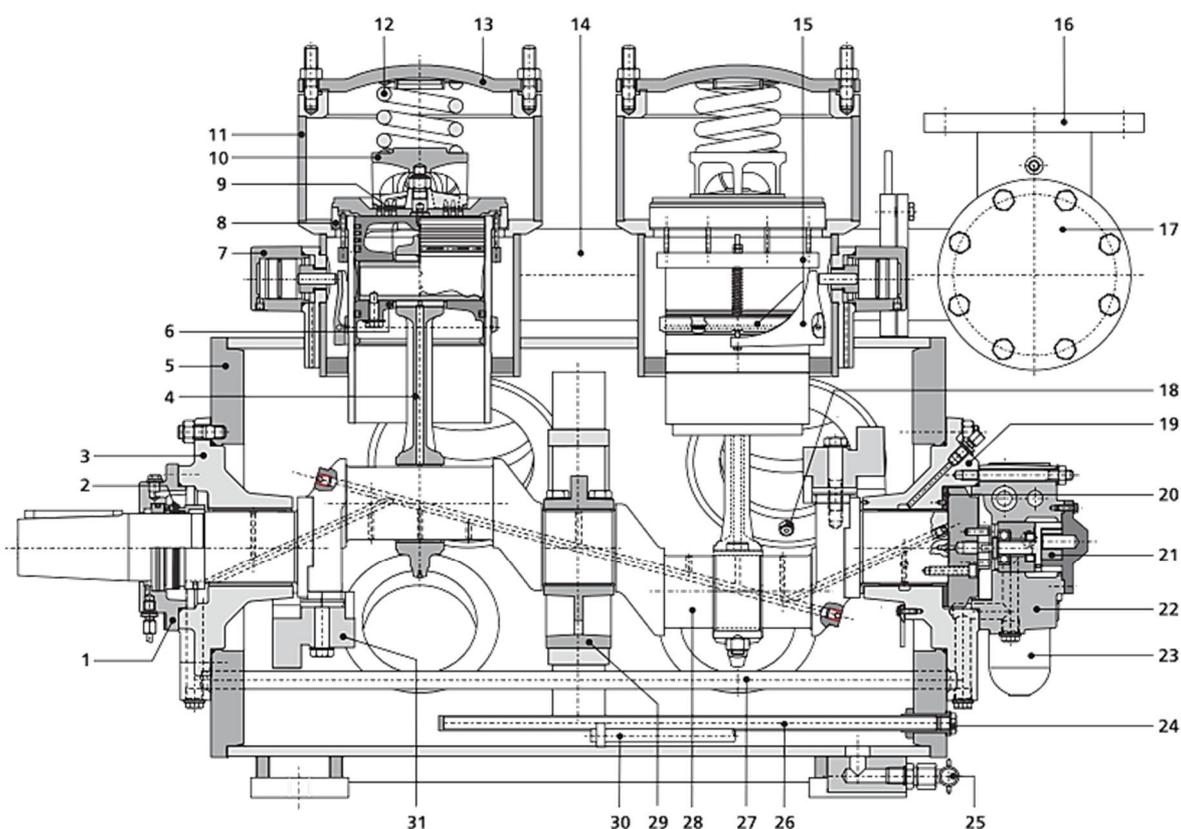


Рисунок 5.2.1 Разрез поршневого компрессора



Рисунок 5.2.2 Схема винтового компрессора

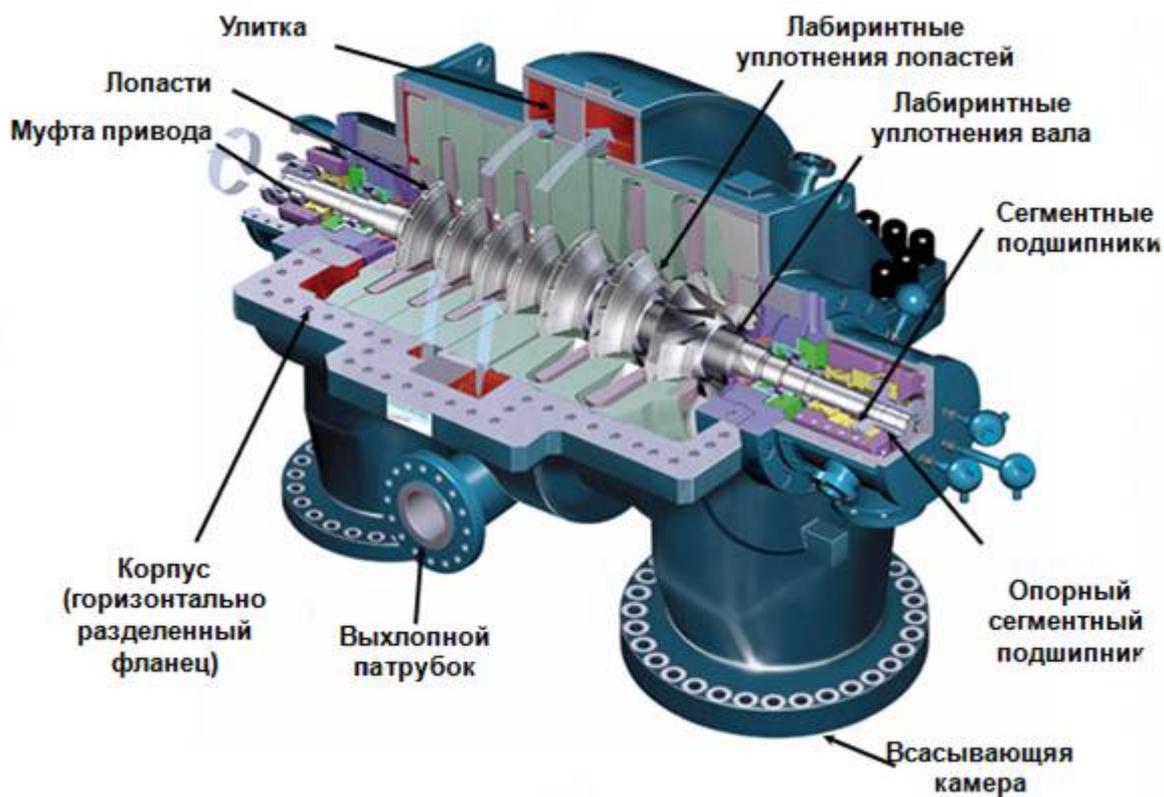


Рисунок 5.2.3 Центробежный компрессор

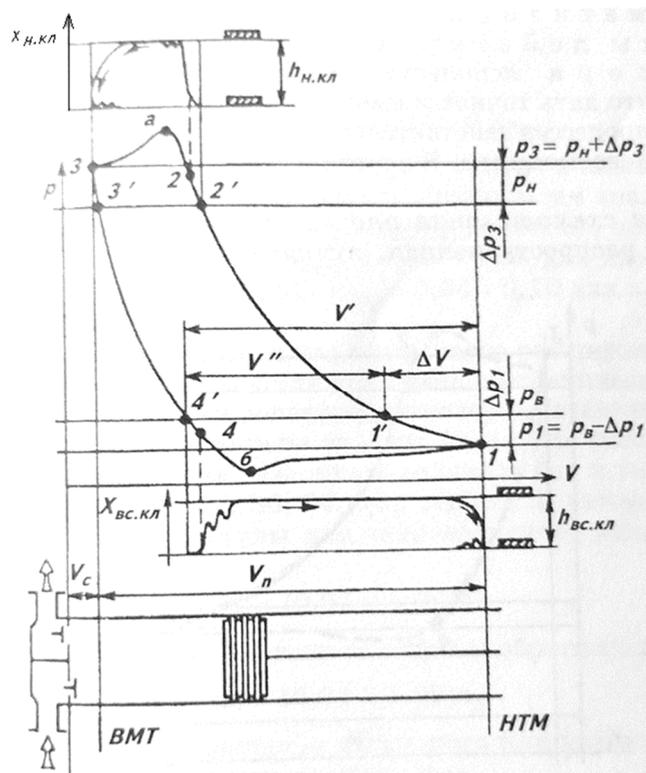


Рисунок 5.2.4 – Индикаторная диаграмма поршневого компрессора

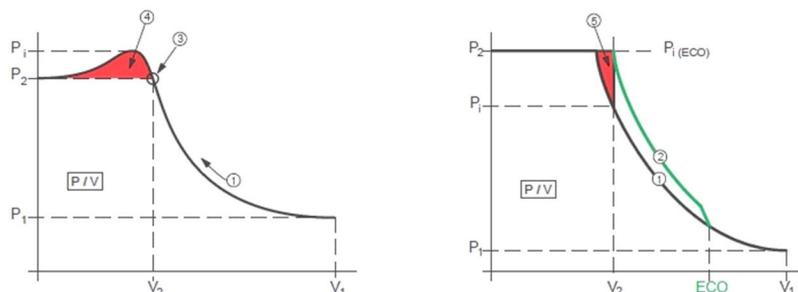


Рисунок 5.2.5 – Индикаторная диаграмма винтового компрессора

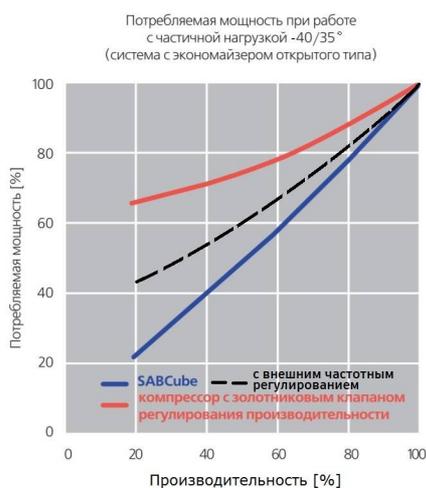


Рисунок 5.2.6 – Эффективность регулирования производительности винтовых компрессорных агрегатов SABCube (Johnson Controls) с изменяемой частотой вращения ротора, с внешним частотным регулятором и с золотниковым регулированием

Результат | Пределы | Технические данные | Размеры | Информация | Документация | Обучения

Начальная точка выбора мотора см. "Техн. данные/примечания"
*в соответствии с EN12900 (10K перегрев всасываемого газа, переохлаждение жидкости в экономайзере с разницей температур 5K)

Компрессор	OSN8571-K	OSN8591-K
Ступени регулирования производительности	100%	100%
Холодопроизвод-сть	171,6 kW	216 kW
Холодопроизвод-сть*	174,3 kW	219 kW
Произв-сть испарителя	160,4 kW	202 kW
Мощность на валу	92,9 kW	118,5 kW
Производительность конденсатора	260 kW	329 kW
SOR/КПД	1,73	1,70
SOR/КПД *	1,85	1,82
Массов. расход LP	4377 kg/h	5679 kg/h
Массов. расход HP	5691 kg/h	7161 kg/h
Режим эксплуатации	Экономайзер	Экономайзер
Темп. жид-ти (переохлажд-ель)	16,56 °C	19,46 °C
Масс. расход ECO	1314 kg/h	1482 kg/h
Произв-ть переохлажд-я	43,6 kW	49,8 kW
Темп. насыщ паров ECO	6,56 °C	9,46 °C
ECO-давление	7,40 bar(a)	8,07 bar(a)
Объемн. расход масла	2,73 m³/h	3,44 m³/h
Способ охлаждения	—	—
Необх. мотор привода	110,0 kW	160,0 kW
Температура нагнетания без охлаждения	74,5 °C	75,1 °C

Рисунок 5.2.7 – Подбор компрессорного агрегата с помощью программы *Bitzer Software* [32]

Результат | Пределы | Технические данные | Размеры | Информация | Документация | Обучения

Технические данные OSN8591-K

Технические параметры

Объемная произв-сть (2900об/мин 50 Гц)	535 m³/h
Объемная произв-сть (3500об/мин 60 Гц)	646 m³/h
Допустимый диапазон скоростей	1450 .. 4000 min-1
Направление вращения (компрессор)	rechts / clockwise
Вес	360 kg
Макс. избыточное давление (НД/ВД)	19 / 28 bar
Присоединение линии всасывания	DN 100
Присоединение линии всасывания (NH3)	DN 100
Присоединение линии нагнетания	76 mm - 3 1/8"
Присоединение линии нагнетания (NH3)	DN 80
Адаптер для ECO (NH3)	DN 30 (Option)
Тип масла для R22	B150SH, B100 (Option)
Тип масла для R134a/R404A/R507A/R407A/R407F	BSE170 (Option)

Комплект поставки

Предохранительный клапан давления	Standard
Обратный клапан	Standard

Рисунок 5.2.8 – Результат подбора компрессорного агрегата с помощью программы

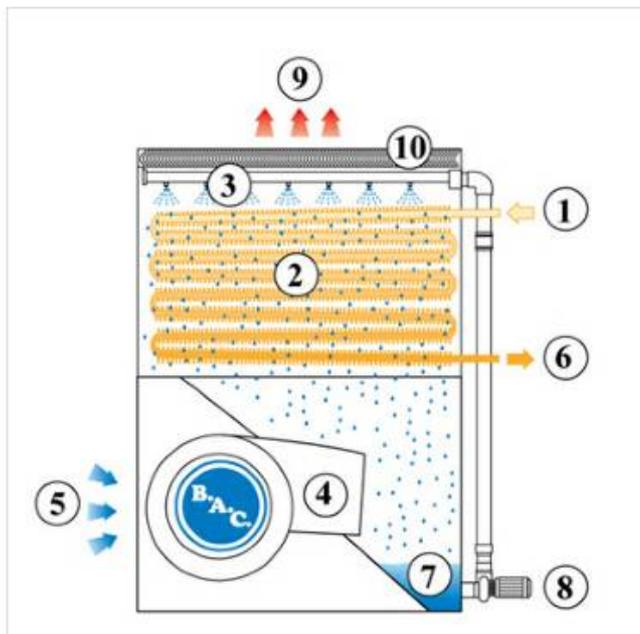
5.3 Расчет и подбор конденсаторов

Для расчета и подбора различных типов испарительных конденсаторов может применяться программа [33] фирмы *BALTIMORE AIRCOIL* (США) и программа [34] расчета и подбора конденсаторов воздушного охлаждения фирмы *Güntner* (Германия).

В программе расчета испарительных конденсаторов сначала дается краткое описание и функциональная схема (представлены на рисунке 5.3.1). Характер изменения температуры воды и воздуха в испарительных конденсаторах приведен на рисунке 5.3.2. Различные методы расчета конденсаторов приведены в целом ряде публикаций [30, 42].

Для пользователей программы приведен шаблон с исходными данными, по завершении работы программы выводятся результаты расчета и подбора оборудования, основные характеристики (см. рисунок 5.3.3 – 5.3.5).

Перечень исходных данных и результаты расчета и подбора конденсаторов воздушного охлаждения, полученные с помощью программы фирмы *Güntner*, приведены на рисунках 5.3.6 – 5.3.8. Методы расчета конденсаторов воздушного охлаждения приведены в [30, 43].



Пар (1) поступает в змеевик **испарительного конденсатора (2)**, который орошается водой, разбрызгиваемой **системой орошения (3)** в верхней части конденсатора. Одновременно **радиальный вентилятор (4)**, расположенный в нижней части изделия, продувает наружный **воздух (5)** вверх через конденсатор. Во время работы тепло переносится из внутреннего контура к оросительной воде, а затем в атмосферу за счет испарения части воды. Далее сконденсированный пар **покидает установку (6)**. Вода собирается в **поддоне (7)** или бассейне. **Насос (8)** рециркуляции оросительной воды снова подает ее в систему орошения. Теплый насыщенный **воздух (9)** покидает конденсатор через **каплеуловители (10)**, которые удаляют из воздуха капельки воды.

Рисунок 5.3.1 – Принцип работы испарительного конденсатора

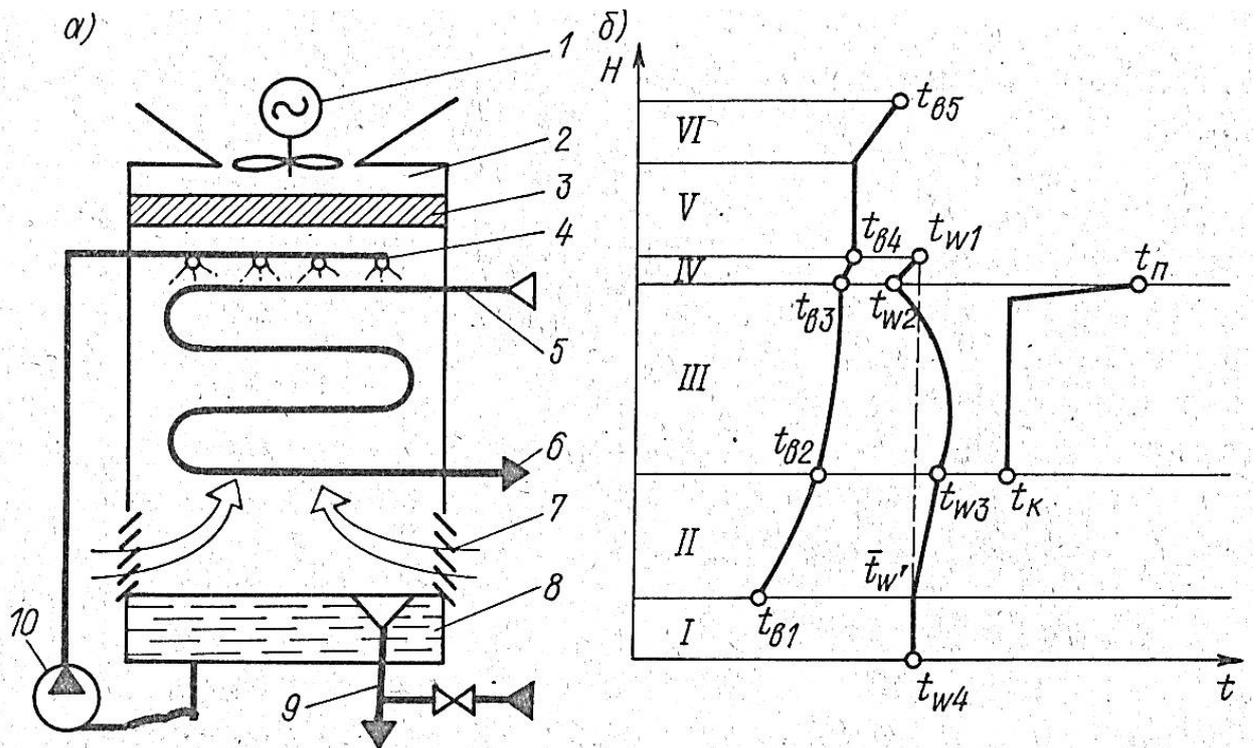


Рисунок 5.3.2 – Характер изменения температуры воды t_w и воздуха t_B в испарительных конденсаторах

The screenshot shows the 'Selection Software' interface for evaporative condensators. The top navigation bar includes 'About', 'Need assistance?', 'BAC website', and 'Logout'. The main menu shows 'Product Group' set to 'Input'. The selected product is 'VXC' under 'Evaporative Condensators: VXC'.
 The 'Condenser Section' includes:
 - Refrigerant: NH3-R717
 - Split for Oil Cooling:
 - Condensing Capacity: 835 kW
 - Condensing Temperature: 35 °C
 The 'Ambient Temperature' section includes:
 - Wet Bulb Temperature: 21 °C
 The 'Sound' section includes:
 - Distance (m): 15
 At the bottom, there are 'Back' and 'Next' navigation buttons.

BAC Selection software 0.7.11 - Copyright © 2021 - Baltimore Aircoil International - [Legal Notice](#)

Рисунок 5.3.3 – Исходные данные для расчёта и подбора испарительных конденсаторов с помощью программы [33]



Product Group ▶ Input ▼ **Results**

VXC VCL Polairis Condenser 2 PCE L PCE W CXVE L CXVE W CXV-D W CXV-D L

Model: 1 x VXC 221

Thermal Performance : 835.0 kW (Design) / 889.0 kW (Max); NH3-R717; 35.0 / 21.0 °C



Extra ▶

Physical Data

Length :	4010 mm
Width :	2397 mm
Height :	3585 mm
Operating Weight :	5860 kg

Motor Data

Fan Motor (Number) :	(1x) 15.0 kW
Airflow :	20.8 m ³ /s
Spray Pump (Number) :	(1x) 2.2 kW
Spray Water flow :	19.2 l/s

Hydraulic Data

Total Pressure Drop :	1 kPa
-----------------------	-------

Sound Data

Sound Pressure Level at 15.0m from quietest side :	56 dB(A)
Sound Power Level :	95 dB

1 x VXC 205 (825.0 kW)	
1 x VXC 221 (889.0 kW)	★★★★
1 x VXC 250 (1006.0 kW)	★★★
1 x VXC C220 (884.0 kW)	★

< Back

Next >

Рисунок 5.3.4 – Результаты подбора испарительных конденсаторов с помощью программы [33]



Технические характеристики

Refro-PKB

191002 St.Petersburg
Russian Federation

Дата: 09/02/2021

VXC 221

Заданные параметры

Запрашиваемая мощность конденсации (всего/на установку)	835 / 835 кВт
Макс. производительность (общая/на установку) (@ 100% RPM)	889 / 889 кВт
Хладагент	NH3-R717
Температура конденсации	35.0 °C
Заданная температура по мокрому термометру	21.0 °C
Входная температура по сухому термометру	31.0 °C
Рабочий режим	Мокрый

Предложение

(1) Испарительный конденсатор(ы) (Нагнетательный вентилятор / центробежный) Модель VXC 221

Технические характеристики

Общая длина	4010 мм
Общая ширина	2397 мм
Общая высота	3585 мм
Транспортировочный/рабочий вес	4250 / 5860 кг
Вес наиболее тяжелой секции	2630 кг
Антикоррозионное исполнение	BALTIPLUS
Мощность на валу вентилятора	1 x 14.0 кВт
Кол-во двигателей вентиляторов и мощность каждого	1 x 15.0 кВт
Частота	50 Гц
Напряжение питания двигателя вентилятора	400 В
Efficiency level fan motor	IE3
Расход воздуха(@ 100% RPM)	20.8 м³/с
Циркуляционный насос	1 x 2.2 кВт
Частота	50 Гц
Efficiency level pump motor	IE3
Расход воды на орошение	1 x 19.2 л/с
Объем хладагента NH3-R717	118.0 кг
Максимальное испарение (@ 835.0 кВт)	0.321 л/с
Подпитка (Кол-во циклов испарения воды до достижения пдк 2.5)	0.535 л/с
Разрешен сухой режим	Нет
Гидравлические потери давления	1 кПа
Акустические показатели (Для установки без учёта доп.оборудования / Включая доп.оборудование)	
Максимальная скорость	56 дБ(A)

Все акустические показатели такие как уровень звукового давления на расстоянии 15.0 м от наиболее тихой стороны в свободном поле

* Доп.оборудование может изменить вес и габариты

* Опции (такие как фланцы, тэны и тд), установленные вдоль длинной стороны аппарата, поставляются отдельно (не смонтированными), в случае если они влияют на транспортную ширину грузовика (больше или равно 2,4 м).

* For safety reasons ladders are only allowed in combination with railing.

* When a VT0/VT1/VXI/VXC unit is installed elevated by 30cm or more, a solid bottom is required. (Note: insulated solid bottom is included in intake attenuator)

Покупатель:Refro-PKB
Проект:
Офис:
Пользователь:alkrWEB

BALTIMORE AIRCOIL
S2Q VS³qWeb

BAC ссылка:
2021-02-09
P 1/2
quoteNr:

Рисунок 5.3.5 – Технические характеристики выбранного испарительного конденсатора

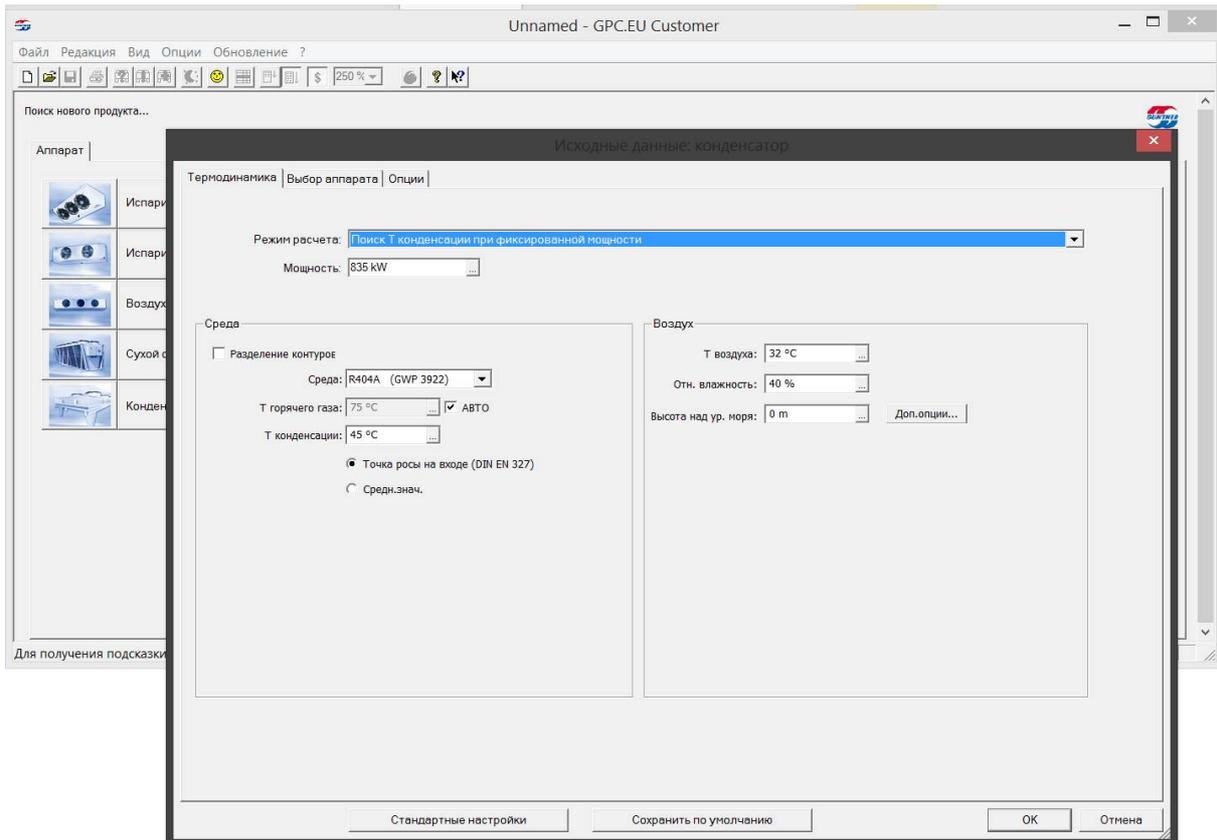


Рисунок 5.3.6 – Исходные данные для расчёта и подбора воздушных конденсаторов с помощью программы [34]

Тип аппарата	Т конденсации [°C]	Пл. пов-ти [м²]	Объем труб [л]	потери давлени [бар / К]	Воздух [м³/ч]	Скор. вращ. [min-1]	Технология эл...	количество двигател на один дв...	Потребл. ток на один дв...	звукowego дая [дБ(A)]	Длина [mm]	Ширина [mm]	Высота [mm]	оной аппа [EUR]	Всего: [EUR]
GVD 090.58/2x5-NS.E	45.2	3416.6	263.8	0.94 / 1.95	222737	700	AC	2.50	4.30	62	6694	2300	2532	52108.00	52108.00
GVD 090.5A/2x6-ND.E	43.3	2733.3	230.0	0.32 / 0.65	360351	890	AC	3.60	7.20	68	7959	2300	2532	52301.00	52301.00
GVD 090.5A/2x6-NS.E	45.0	2733.3	217.2	0.31 / 0.65	285443	700	AC	2.50	4.30	62	7959	2300	2532	52301.00	52301.00
GVD 090.58/2x4-ND.E	46.2	2733.2	319.0	0.76 / 1.58	236709	890	AC	3.60	7.20	68	8429	2300	2532	42361.00	42361.00
GVD 090.58/2x5-ND.E	44.9	3416.6	263.8	0.94 / 1.95	230224	940	AC	2.20	4.80	59	6694	2300	2532	53224.00	53224.00
GVD 090.58/2x5-MS.E	46.0	3416.6	263.8	0.94 / 1.94	204178	820	AC	1.70	3.00	56	6694	2300	2532	53224.00	53224.00
GVD 080.5A/2x7-ND.E	43.9	3188.8	259.9	0.36 / 0.75	289411	890	AC	1.92	4.00	59	9224	2300	2532	53307.00	53307.00
GVD 080.58/2x5-ND.E	46.4	3416.6	263.8	0.94 / 1.94	197732	890	AC	1.92	4.00	58	6694	2300	2532	47072.00	47072.00
GVD 080.5C/2x6-MD.E	45.3	3730.1	238.2	0.24 / 0.49	224040	925	AC	1.36	3.17	55	7934	2300	2850	51940.00	51940.00
GVD 090.50/2x4-ND.E	45.2	3123.8	240.2	0.59 / 1.20	236886	890	AC	3.60	7.20	65	5404	2400	2850	45110.00	45110.00
GVD 080.5C/2x6-NS.E	46.2	3730.1	238.2	0.24 / 0.49	204118	680	AC	1.21	2.24	51	7934	2300	2850	50270.00	50270.00
GVD 090.5A/2x7-NS.E	45.9	2277.7	187.3	0.27 / 0.55	300293	890	AC	3.60	7.20	67	6694	2300	2532	44881.00	44881.00
GVD 080.5A/2x7-ND.E	45.7	3188.8	247.1	0.36 / 0.75	235385	680	AC	1.21	2.24	52	9224	2300	2532	53307.00	53307.00
GVD 080.5A/2x6-ND.E	46.2	2733.2	217.2	0.31 / 0.65	248067	890	AC	1.92	4.00	58	7959	2300	2532	46257.00	46257.00
GVD 080.50/2x5-ND.E	45.4	3904.7	291.5	0.71 / 1.47	204493	890	AC	1.92	4.00	57	6669	2400	2850	50311.00	50311.00
GVD 090.5C/2x5-ND.E	43.8	3108.5	215.4	0.20 / 0.42	304627	890	AC	3.60	7.20	66	6669	2300	2850	48099.00	48099.00
GVD 090.5C/2x5-NS.E	45.6	3108.5	204.6	1.66 / 3.43	241607	700	AC	2.50	4.30	60	6669	2300	2850	48099.00	48099.00
GVD 080.5C/2x6-ND.E	44.3	3730.1	249.6	0.24 / 0.49	250555	890	AC	1.92	4.00	58	7934	2300	2850	50270.00	50270.00
GVD 090.5C/2x5-MD.E	45.5	3108.5	204.6	1.66 / 3.44	244758	940	AC	2.20	4.80	57	6669	2300	2850	48940.00	48940.00
GVD 090.58/2x5-ND.E	43.2	3416.6	276.6	0.95 / 1.97	283385	890	AC	3.60	7.20	68	6694	2300	2532	52108.00	52108.00

Рисунок 5.3.7 – Результаты подбора воздушных конденсаторов с помощью программы [34]



Дата: 2021-02-10
 Запрос от:
 Проект:
 № предложения:
 Позиция:
 Контактное лицо:

Конденсатор		GVD 080.5B/2x5-ND.E Только для расчета!	
Мощность:	835.0 kW	Хладагент:	R404A⁽¹⁾
Объемн. расход возд.:	197732 m ³ /h	Т горячего газа:	75.0 °C
Воздух на входе:	32.0 °C	Темп. конденсации (точка росы):	46.4 °C
Высота над ур. моря:	0 m	Т выхода конденсата:	43.3 °C
Скорость воздуха:	2.0 m/s	Об. расход гор. Газ:	175.35 m ³ /h
К теплопередачи:	26.04 W/(m ² ·K)	Массовый расход:	19369 kg/h
		Потери давления:	0.94 bar / 1.94 K
Вентиляторы (AC):	10 Шт. 3~400V 50HzΔ/(Y)	Уровень звукового давления:	58 dB(A) ⁽²⁾
Технические характеристики вент. узла:		на расстоянии:	10.0 m
Скор. вращ.:	890 min-1 / (680 min-1)	Уровень звуковой мощности:	91 dB(A)
Мощность (мех./эл.):	1.41 kW/1.92 kW	ErP:	Compliant ⁽³⁾
Потребл. ток:	4.00 A ⁽⁴⁾		
Общее потребл. эл. энергии:	16.13 kW	класс энергетич. эффективности:	D (2014)
Корпус:	Оцинк. сталь, RAL 7035	Трубы:	Медь ⁽⁵⁾
Площадь пов-ти:	3416.6 m ²	Оребрение:	Алюминий ⁽⁵⁾
Объем труб:	263.8 l	Подключения (на один аппарат):	
Шаг оребрения:	2.40 mm	Вход:	2 x 76.1 * 3.00 mm
Нходов:	4	Выход:	2 x 76.1 * 3.00 mm
Вес (пустой):	2564 kg ⁽⁶⁾	Распределители:	2 * 63
Макс. рабочее давление:	32.0 bar	PED classification:	Категория IV, module B+D ⁽⁷⁾
Размеры:⁽⁶⁾			
Длина:	6694 mm		
Ширина:	2300 mm		
Высота:	2532 mm ⁽⁶⁾		
Кол-во ножек:	8		
Прайс-лист (на условиях EXW):		Шт.	Стоимость:
Стоимость аппарата:		1	47072.00 EUR
Условия поставки:			Всего: 47072.00 EUR
Условия оплаты:			
Срок изготовления:	6 недель ⁽⁸⁾ (Состояние: 2021-02-10)		
Срок действия предл.:			
Действуют наши стандартные условия оплаты и поставки!			

GFC.EU Customer, 2020.19-225b/2020-12-17, PL 5/2019 · Уname · Страница 1 из 2 · MTO · GVD 080.5B/2x5-ND.E/L2

Рисунок 5.3.8 – Технические характеристики подобранного воздушного конденсатора

5.4 Расчет и подбор воздухоохлаждателей

Для расчета и выбора воздухоохлаждателей может использоваться программа фирмы *Güntner* [34].

Для пользователей программы приведен шаблон с исходными данными, по завершении работы программы выводятся результаты расчета и подбора оборудования, основные характеристики (см. рисунок 5.4.1 – 5.4.3). Методы расчета воздухоохлаждателей приведены в [30, 44].

Рисунок 5.4.1 – Исходные данные для подбора воздухоохлаждателя с помощью программы [34]

Тип аппарата	Зерка поверхность [%]	Пл. пов-ти [м²]	Объем труб [л]	отери давлени [бар / K]	Воздух [м³/ч]	Скор. вращ [мин-1]	Технология эл...	мощность двигат на один дв...	Потребл. ток на один дв...	звукового давл [dB(A)]	Длин [мм]
GACV RX 045.1HF/3A-40-A-15...	-8.7	160.1	31.0	0.13 / 1.40	13740	1360	AC	0.47	2.20	58	16
GACV RX 045.1FF/4A-40-A-15...	-6.0	160.1	30.9	0.29 / 3.25	17267	1400	AC	0.36	0.74	56	16
GACV RX 045.1F/3A-70-A-15...	-2.2	143.5	45.2	0.18 / 1.95	14136	1360	AC	0.47	2.20	58	16
GACV RX 045.1HF/4A-40-A-15...	34.1	213.4	40.5	0.16 / 1.74	18320	1360	AC	0.47	2.20	59	16
GACV RX 045.1FF/4A-40-A-15...	2.3	160.1	30.9	0.29 / 3.24	19495	1360	AC	0.47	2.20	59	18
GACV RX 045.1HF/4A-70-A-15...	4.1	127.5	40.5	0.16 / 1.74	20222	1360	AC	0.47	2.20	59	18
GACV RX 090.1HF/3A-40-A-15...	3.9	137.4	30.8	0.16 / 2.02	19086	1340	AC	0.62	1.10	62	22
GACV RX 090.1FF/3A-70-A-15...	7.9	123.4	40.8	0.13 / 1.10	17259	1310	AC	0.52	1.10	61	22
GACC RX 050.2/3-70-A-22528...	2.2	120.9	40.8	0.10 / 1.10	20040	1390	AC	0.75	1.80	60	23
GACV RX 063.1HF/2A-40-A-16...	6.0	179.8	35.8	0.04 / 0.49	15151	890	AC	0.60	1.20	50	23
GACV RX 080.1HF/1A-40-A-17...	16.1	191.8	38.9	0.15 / 1.67	16366	890	AC	1.40	2.70	65	32
GACV RX 080.1FF/1A-40-A-17...	-7.2	143.9	30.2	0.12 / 1.32	17362	890	AC	1.40	2.70	64	34
GACV RX 080.1HF/1A-70-A-17...	-8.7	114.6	39.0	0.07 / 0.72	17990	890	AC	1.40	2.70	63	35
GACV RX 080.1HF/1A-40-A-17...	25.7	191.8	38.9	0.15 / 1.67	18628	1330	AC	2.30	4.20	70	36
GACV RX 090.1DF/1A-40-A-18...	-5.0	127.9	28.3	0.16 / 1.76	27278	885	AC	2.48	5.15	59	37
GACV RX 080.1FF/1A-40-A-17...	-1.1	143.9	30.2	0.12 / 1.32	19448	1330	AC	2.30	4.20	69	38
GACV RX 063.1FF/2A-40-A-16...	5.2	134.9	27.6	0.08 / 0.88	25182	1400	AC	1.75	3.70	67	38
GACV RX 090.1DF/1A-40-A-18...	0.0	127.9	28.3	0.16 / 1.76	31189	890	AC	3.60	7.20	69	43
GACV RX 071.1F/1A-70-A-16Z...	-9.7	109.6	26.7	0.05 / 0.51	15910	1330	AC	2.60	4.80	66	45
GACV RX 071.1DF/2A-40-A-17...	1.2	122.3	25.2	0.24 / 2.61	35739	1330	AC	2.60	4.80	68	56

Рисунок 5.4.2 – Результаты подбора воздухоохлаждателя



Дата: 2021-02-10
 Запрос от:
 Проект:
 № предложения:
 Позиция:
 Контактное лицо:



Испаритель (dx) GACV RX 050.1HF/3A-70.A

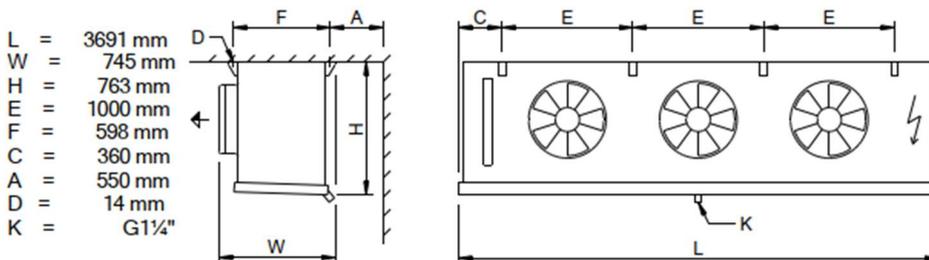
Мощность:	28.0 kW ⁽¹⁾	Хладагент:	R404A ⁽²⁾
Резерв поверхности:	2.2 %	Темп. испарения (точка росы):	-28.0 °C
Объемн. расход возд.:	19752 m³/h	Перегрев:	7.0 K
Воздух на входе:	-20.0 °C	Темп. конденсации (точка росы):	35.0 °C
Воздух на выходе:	-23.5 °C	Т переохладения:	29.6 °C
Давление воздуха:	1013 mbar		

Вентиляторы (AC):	3 Шт. 3~400V 50HzΔ/(Y)	Уровень звукового давления:	61 dB(A) в 3.0 м ⁽³⁾
Технические характеристики вент. узла:		Уровень звуковой мощности:	84 dB(A)
Скор. вращ.:	1340 min-1 / (990 min-1)	Струя воздуха:	около 22 м ⁽⁴⁾
Мощность (мех./эл.):	0.50 kW/0.62 kW	Иней:	1.0 mm
Потребл. ток:	1.10 A ⁽⁵⁾		
ErP:	Compliant ⁽⁶⁾		

Общее потребл. эл. энергии: 1.70 kW класс энергетич. эффективности: C (2014)

Корпус:	AlMg, RAL 9003	Трубы:	Медь ⁽⁷⁾
Площадь пов-ти:	125.4 m²	Оребрение:	Алюминий ⁽⁷⁾
Объем труб:	40.3 l	Потери давл. в "пауке":	1.4 bar
Шаг оребрения:	7.00 mm	Выход:	54.0 * 2.40 mm
Вес (пустой):	194 kg ⁽⁸⁾	Вход:	28.0 * 1.50 mm
Макс. рабочее давление:	32.0 bar	PED classification:	Категория I, module A ⁽⁹⁾
Распределители:	28	Нходов:	4
К-во контуров:	1N	Подкл. отн. движ. воздуха:	справа

Размеры:



Сливной патрубок по DIN ISO 228-1 с G-резьбой (плоское уплотнение).
 Внимание: схема и размеры распространяются не на все комплектующие!

UI: 15Y3.01D
 Product code: 253-15Y3.01D.0LX.S1PF-1R233.00.01.0000.0000.0000.0000

Прайс-лист (на условиях EXW):	Шт.	Стоимость:	Всего:
Стоимость аппарата:	1	6088.00 EUR	6088.00 EUR
Комплектующие:			
Монтаж и подключение на заводе-изготовителе (Шкаф управления, Вентилятор)	1		
Terminal box ⁽¹⁰⁾	1		
Fans grouped			
1 x (5209324) Terminal Block for Fan TB Fan 3ph 2.5 mini x3			
1 x (5209834) Terminal Block for Fan 03xTK			
1 x (5209443) Terminal Box (Plastic) 130x130x99mm			
Всего (прайс-лист без НДС, включ. упаковку)			6088.00 EUR

Рисунок 5.4.3 – Технические характеристики выбранного воздухоохладителя

5.5 Расчет и выбор трубопроводов

Расчет гидравлических потерь определяется исходя из значений диаметров трубопроводов и скоростей потоков, полученных в процессе оптимизации или рекомендуемых значений.

Для расчета параметров трубопроводов может применяться программа расчета и выбора трубопроводов с наличием различных местных сопротивлений *Coolselector2* (фирма *Danfoss*) [35] и программа расчета толщины изоляции трубопроводов и емкостного оборудования *K-PROJECT 2.0* (фирма *K-Flex*) [36]. В каждом случае приводятся шаблоны для формирования исходных данных и результаты расчета (см. рисунок 5.5.1-5.5.4).

The screenshot displays the Coolselector2 software interface. The main workspace shows a schematic diagram of a refrigeration system with a condenser and an evaporator. The right sidebar contains a table with the following data:

Точка	Описание	Температура [°C]	Давление [bar]	Плотность [kg/m³]	Энтальпия [kJ/kg]	Энтропия [kJ/(kg·K)]
1	Всасывание компрессора	-10,0	2,500	11,95	364,8	1,671
2	Нагнетание компрессора (приблизительно)	70,1	16,24	67,75	421,5	1,718
2s	Точка росы при конденсации	35,4	16,24	88,3	379,5	1,589
3s	Температура начала конденсации	35,0	16,24	994,3	251,9	1,175
3a	Выход конденсатора	33,0	16,24	1005	248,7	1,165

Рисунок 5.5.1 – Расчет трубопроводов с помощью *Coolselector2* [35]

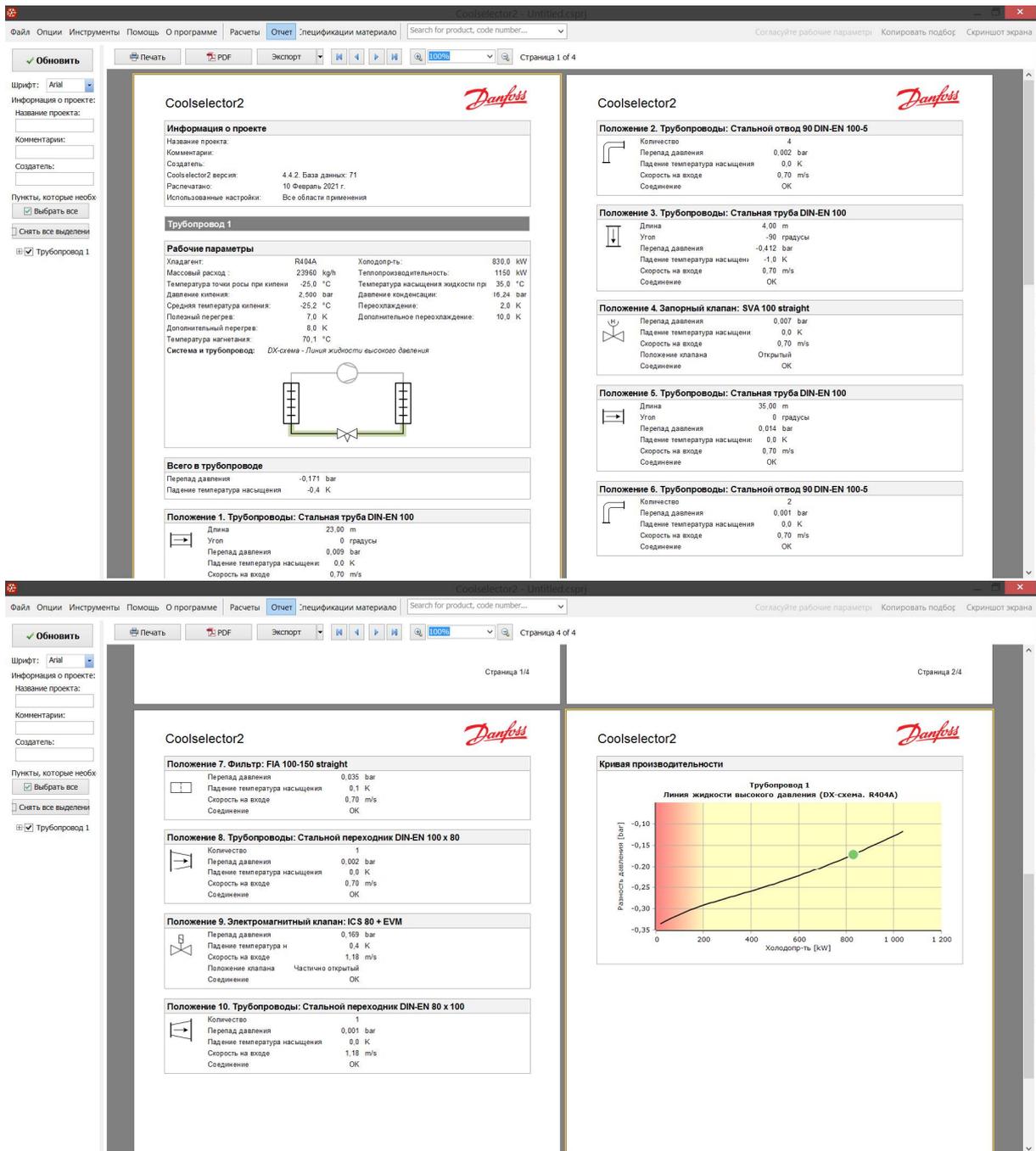


Рисунок 5.5.2 – Технические характеристики выбранного трубопровода

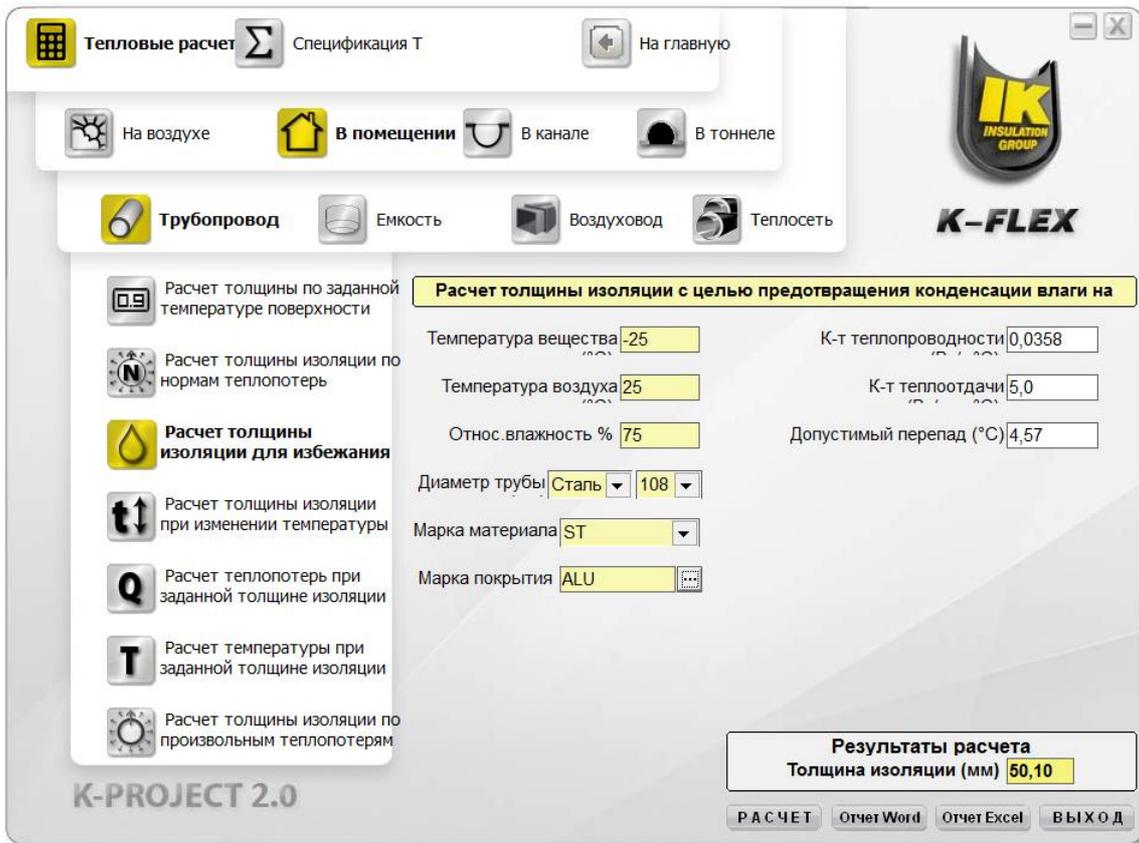


Рисунок 5.5.3 – Расчет тепловой изоляции трубопроводов с помощью [36]

K-PROJECT 2.0 Расчет основан на СП 61.13330.2012 и ТР12324-ТН.2008




РАСЧЕТ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ Дата: 10.02.2021 2:44

Название расчета
Расчет толщины изоляции для предотвращения конденсации на наружной поверхности трубопровода.

Проект -----
Компания -----

Исходные данные		Результаты расчета	
Условия расчета	в помещении	Толщина изоляции (мм)	50,10
Температура вещества (°C)	-25,00	Ср. теплопроводность (Вт/м°C)	0,0358
Температура воздуха (°C)	25,00	К-т теплоотдачи (Вт/кв.м°C)	5,0
Отн. влажность воздуха (%)	75,00		
Диаметр трубопровода (мм)	108,000		
Марка материала	ST		
Марка покрытия	ALU		

Рисунок 5.5.4 – Результат подбора тепловой изоляции трубопровода

5.6 Расчет и выбор насосного оборудования

В холодильной технике используются чаще всего динамические насосы (в основном центробежные), где механическая энергия жидкости возрастает благодаря взаимодействию рабочих колес и обтекаемых их потоков. Конструкция центробежного насоса приведена на рисунке 5.6.1. При этом динамическое и статическое давления возрастают (см. рисунок 5.6.2), кинетическая энергия потоков преобразуется в энергию давления в диффузорах.

Основная характеристика центробежного насоса, представляющая собой зависимость напора от расхода, приведена на рисунке 5.6.3.

Основными параметрами, определяющими характеристики насосов, являются наружные диаметры колес и частоты вращения роторов. Типовые закономерности, связанные с диаметром рабочего колеса, с частотой вращения и характеристиками перекачиваемой жидкости, представлены на рисунках 5.6.4, 5.6.5. Подробная информация с описанием конструкции и методов расчета насосного оборудования изложена в целом ряде работ [38, 39, 40]. Методика расчета и подбора насосов представлена на рисунках 5.6.6-5.6.7.

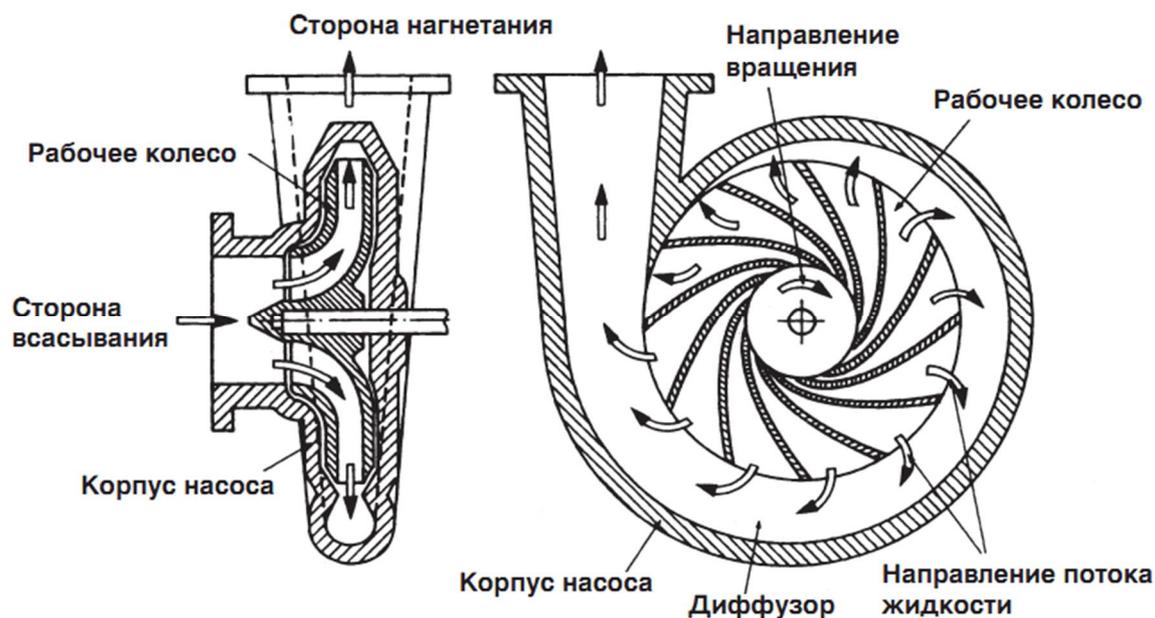


Рисунок 5.6.1 – Конструкция центробежного насоса [40]

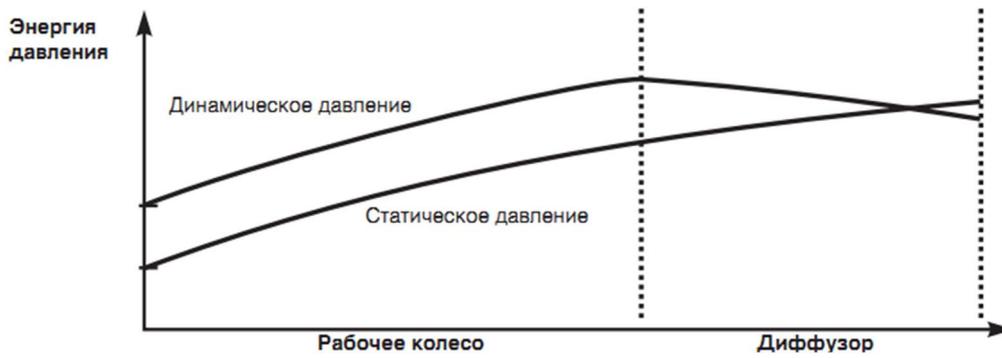


Рисунок 5.6.2 – Преобразование давления в рабочем колесе и диффузоре центробежного насоса [39]

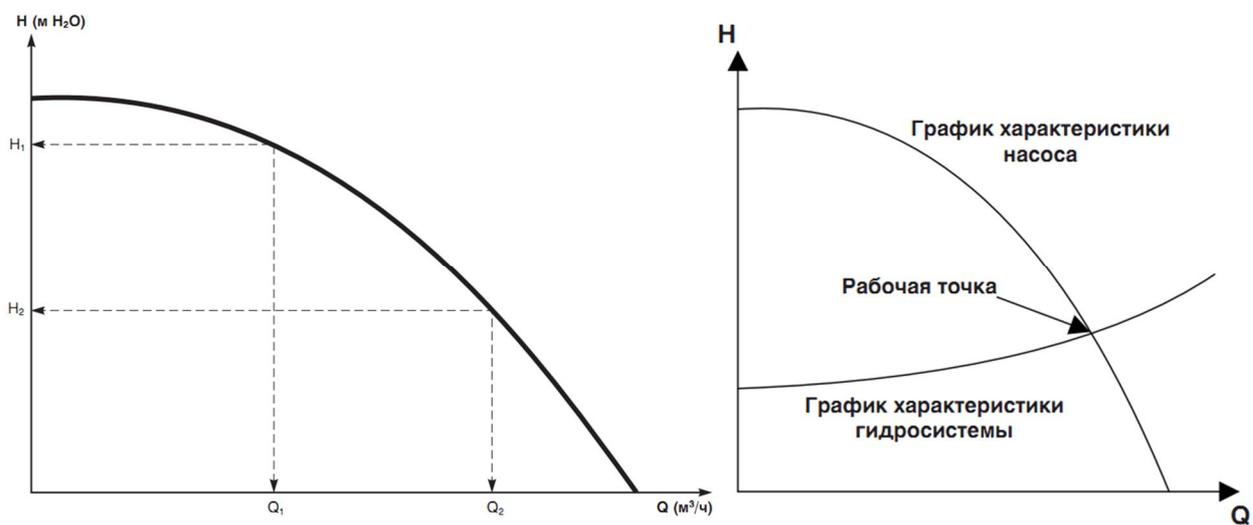


Рисунок 5.6.3 – Рабочая характеристика и рабочая точка насоса [39]

Типовые закономерности

Приведенные далее типовые закономерности демонстрируют теоретическое влияние диаметра (d) рабочего колеса на напор, подачу и потребляемую мощность.

Напор пропорционален диаметру во второй степени:

$$H_b = H_a \cdot \left(\frac{d_b}{d_a}\right)^2$$

Согласно этой закономерности, удвоение диаметра повысит напор в 4 раза.

Подача пропорциональна диаметру в третьей степени:

$$Q_b = Q_a \cdot \left(\frac{d_b}{d_a}\right)^3$$

Согласно этой закономерности, удвоение диаметра повысит подачу в 8 раз.

Потребляемая мощность пропорциональна диаметру в пятой степени:

$$P_b = P_a \cdot \left(\frac{d_b}{d_a}\right)^5$$

Согласно этой закономерности, удвоение диаметра повысит потребляемую мощность в 32 раза.

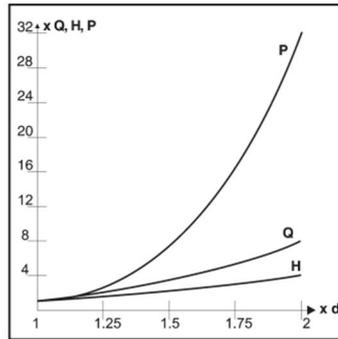


Рис. 19 Типовые закономерности, связанные с диаметром рабочего колеса

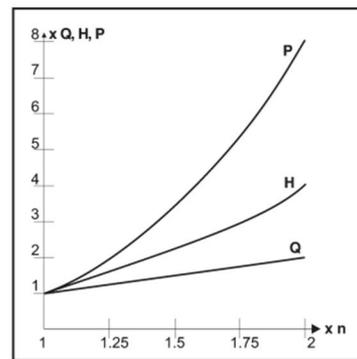


Рис. 20 Типовые закономерности, связанные частотой вращения рабочего колеса

Приведенные далее типовые закономерности демонстрируют теоретическое влияние частоты вращения (n) рабочего колеса на напор, подачу и потребляемую мощность.

Подача пропорциональна частоте вращения:

$$Q_b = Q_a \cdot \frac{n_b}{n_a}$$

Согласно этой закономерности, удвоение частоты вращения в два раза повысит подачу.

Напор пропорционален квадрату частоты вращения:

$$H_b = H_a \cdot \left(\frac{n_b}{n_a}\right)^2$$

Согласно этой закономерности, удвоение частоты вращения в 4 раза повысит напор.

Потребляемая мощность пропорциональна частоте вращения в третьей степени:

$$P_b = P_a \cdot \left(\frac{n_b}{n_a}\right)^3$$

Согласно этой закономерности, удвоение частоты вращения в 8 раз повысит потребляемую мощность.

Рисунок 5.6.4 – Расчетные закономерности для центробежного насоса [38]

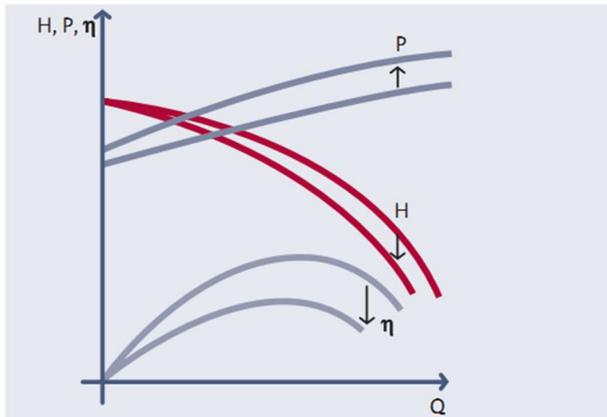


Рис.1.5.2: Изменения напора, КПД и потребляемой мощности для жидкостей с более высокой вязкостью.

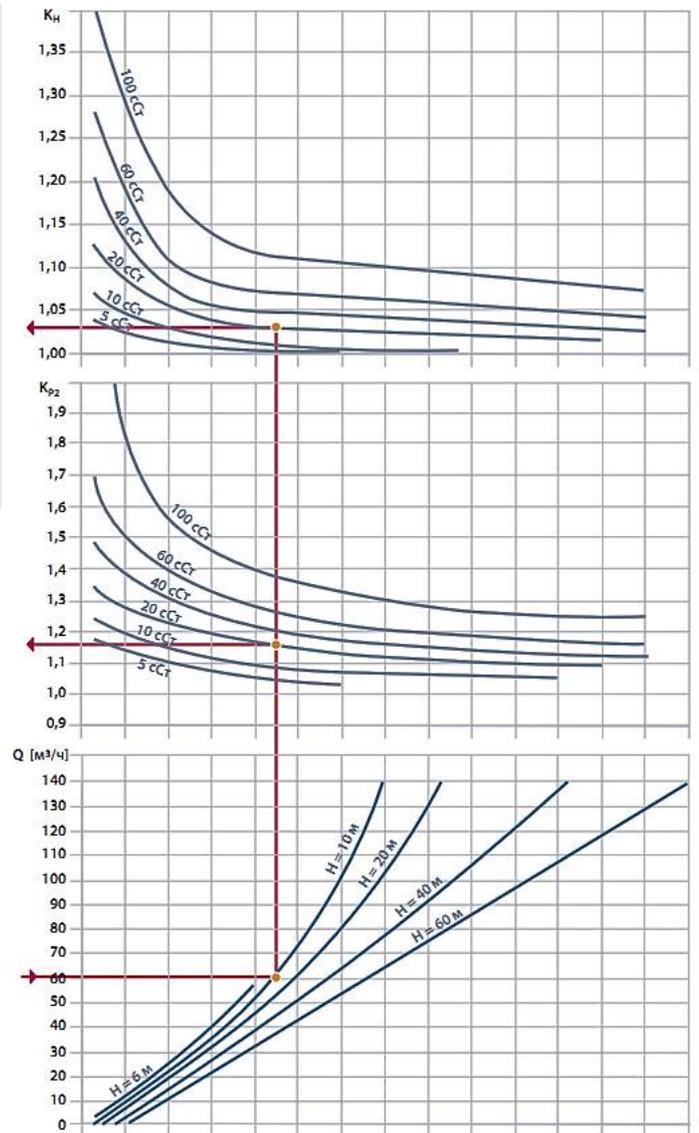


Рис.1.5.3: Определение поправочного коэффициента для напора и потребляемой мощности при различных значениях расхода, напора и вязкости.

Рисунок 5.6.5 – Влияние вязкости жидкости на работу насоса. Расчёт изменения характеристик [40]

Определив по графикам, представленным на рис.1.5.3, значения k_H и k_{P_2} , мы можем найти эквивалентный напор для чистой воды H_W и скорректированную мощность вала P_{2S} по следующей формуле:

$$H_W = k_H \cdot H_S$$

$$P_{2S} = k_{P_2} \cdot P_{2W} \cdot \left(\frac{\rho_s}{\rho_w} \right)$$

где

H_W — эквивалентный напор насоса, если перекачиваемой жидкостью является вода без присадок;

P_{2W} — мощность на валу в рабочей точке (Q_S, H_W) при перекачивании воды;

H_S — необходимый напор перекачиваемой жидкости (с присадками);

P_{2S} — мощность на валу в рабочей точке (Q_S, H_S) при перекачивании воды (с присадками);

ρ_s — плотность перекачиваемой жидкости;

ρ_w — плотность воды = 998 кг/м³;

Подбор насоса основывается на технических данных и характеристиках, представленных для воды. Насос должен удовлетворять характеристике $Q, H = Q_S, H_W$, и электродвигатель должен иметь мощность, достаточную для обеспечения мощности на валу насоса P_{2S} .

На рис.1.5.4 показана последовательность подбора насоса и проверки электродвигателя по потребной мощности.

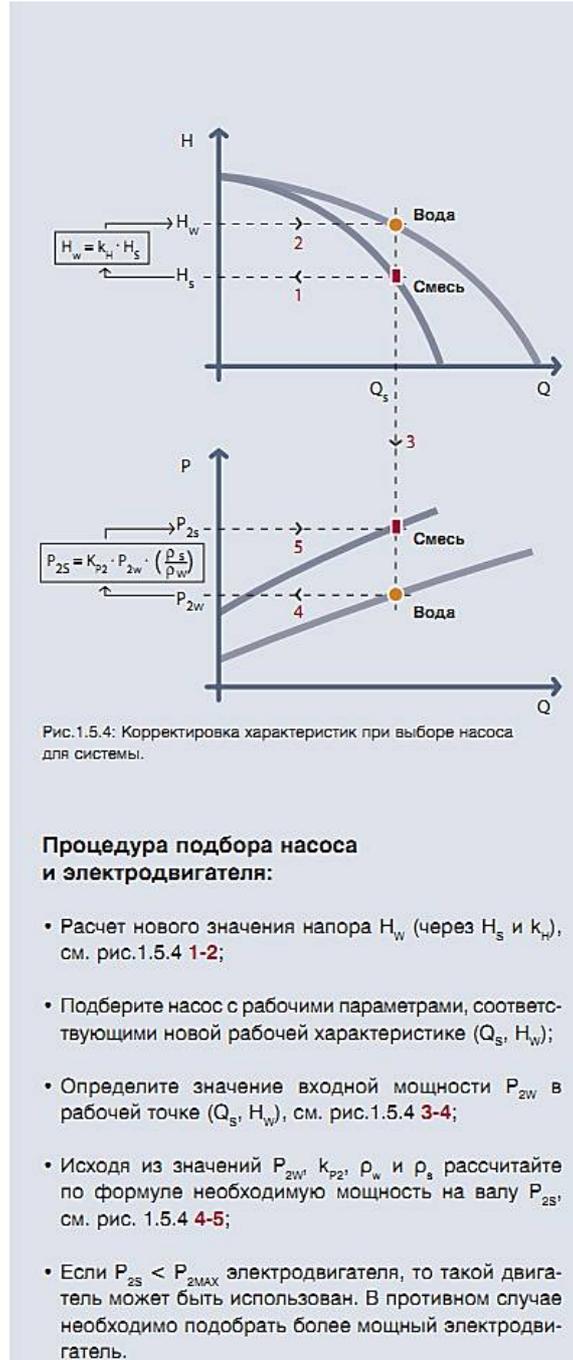


Рисунок 5.6.6 – Подбор насоса и электродвигателя [40]

Кавитация и NPSH

Кавитация появляется в том случае, если давление жидкости в насосе падает до давления ее насыщенных паров, см. рис. 2.2.9 и 2.2.10.

При падении давления на всасывающем патрубке насоса до давления насыщенных паров жидкости (рис. 2.2.10, желтая точка), из нее начинает выделяться растворенный газ. Образуются пузырьки. При последующем увеличении давления происходит мгновенное схлопывание пузырьков (см. рис. 2.2.10, красная точка), сопровождаемое выделением энергии. Поверхности рабочего колеса испытывают тепловое, электрохимическое и ударное воздействие, вследствие чего разрушаются. Степень повреждения при этом зависит от материала, из которых изготовлены колеса. Нержавеющая сталь более устойчива к кавитации, чем бронза, а бронза — более стойкая, чем чугун (см. раздел 1.6.3).

Развивающаяся кавитация вызывает срыв подачи насоса, см. рис. 2.2.11. Повреждения, вызванные кавитацией, зачастую обнаруживаются только после демонтажа насосной части.

Кавитационный расчет

Для проверки работоспособности насоса при риске возникновения в нем кавитации пользуются следующей формулой:

$$h_{\text{макс}} = H_b - H_t - \text{NPSH} - H_v - H_s$$

- $h_{\text{макс}}$ — максимально допустимая высота всасывания (если значение больше нуля) или необходимый подпор (если значение меньше нуля).
- H_b — атмосферное давление со стороны насоса; это максимальная теоретическая высота всасывания, см. рис. 2.2.13.
- H_t — потери давления на трение со стороны всасывания.
- NPSH — аналог понятия «кавитационный запас» (значение определяется по характеристике NPSH при максимальном расходе), см. рис. 2.2.12.
- H_v — давление насыщенных паров перекачиваемой жидкости при определенной температуре; более подробная информация о давлении насыщенных паров воды имеется в приложении D.
- H_s — запас надежности. Экспериментальная величина, обычно равная 0,5–1 м, а для жидкостей, содержащих газ, — до 2 м, см. рис. 2.2.15.



Рис. 2.2.9: Взрыв кавитационных пузырьков на задней стороне лопаток рабочего колеса

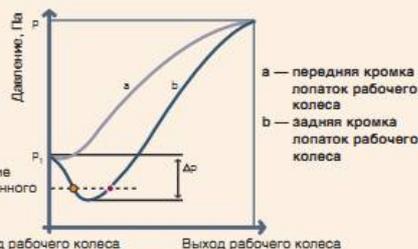


Рис. 2.2.10: Изменение давления в центробежном насосе



Рис. 2.2.11: Характеристика насоса при кавитации

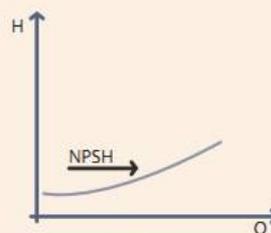


Рис. 2.2.12: NPSH характеристика

Рисунок 5.6.7 – Кавитация в центробежных насосах [40]

Подбор насосов основывается на технических данных и характеристиках, представленных для воды. При перекачивании других жидкостей осуществляется корректировка напора и мощности исходя из значений вязкости жидкости:

$$H_s = H_w/k_h; P_{2s} = k_{p2} \cdot P_{2w} \cdot (\rho_s/\rho_w),$$

где H_w – эквивалентный напор насоса при перекачивании воды;

H_s – необходимый напор насоса при перекачивании жидкости;

P_{2s} – мощность на валу в рабочей точке при перекачивании жидкости;

P_{2w} – мощность на валу в рабочей точке при перекачивании воды;

ρ_w, ρ_s – плотность воды и перекачиваемой жидкости.

Поправочные коэффициенты могут быть найдены с помощью вспомогательных графических (см. рисунок 5.6.6) или расчетных методов. При давлении жидкости на всасывании меньше давления насыщенных паров необходимо осуществлять проверку работоспособности насоса при риске возникновения в нем кавитации [40].

Регулирование производительности насосов осуществляется разными способами. Основные способы регулирования и их сравнение приведены на рисунке 5.6.8.

Для расчета и подбора насосов может использоваться программа [37] (фирмы *Grundfos*). Иллюстрируется шаблон с исходными данными и результаты расчета и подбора оборудования, основные характеристики (см. рисунок 5.6.9-5.6.12).

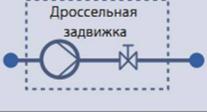
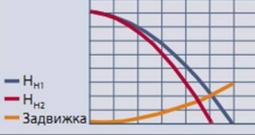
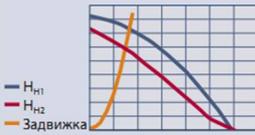
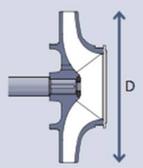
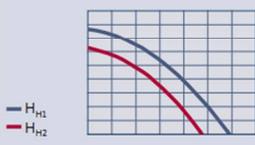
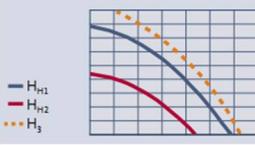
Метод	Возможность продолжительного регулирования	Результирующая характеристика будет иметь	Общий КПД системы	Относительная потребляемая мощность при снижении расхода на 20%
<p>Дроссельная задвижка</p> 	Да	<p>Сниженный Q</p> 	Значительно снижен	94%
<p>Регулирование байпасом</p> 	Да	<p>Сниженный H и изменение вида характеристики</p> 	Значительно снижен	110%
<p>Изменение диаметра рабочего колеса</p> 	Нет	<p>Сниженные Q и H</p> 	Немного уменьшен	67%
<p>Регулирование скорости</p> 	Да	<p>Сниженные Q и H</p> 	Немного уменьшен	65%

Рисунок 5.6.8 – Основные способы регулирования производительности центробежных насосов [40]

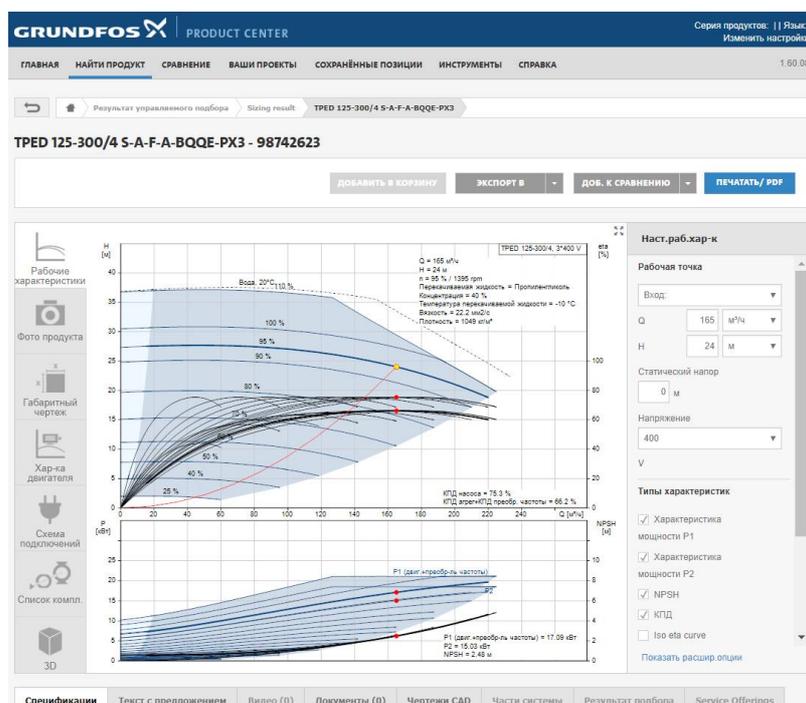


Рисунок 5.6.9 – Исходные данные для расчета и подбора насоса [37]

ПРОЕКТ: _____	УСТРОЙСТВО: _____	КОЛИЧЕСТВО: _____
ПРЕДСТАВЛЕНИЕ: _____	ВИД ОБСЛУЖИВАНИЯ: _____	ДАТА: _____
ИНЖЕНЕР: _____	СОГЛАСОВАНО: _____	ДАТА: _____
ПОСТАВЩИК: _____	ОДОБРЕНО: _____	ДАТА: _____
	№ ЗАКАЗА: _____	ДАТА: _____

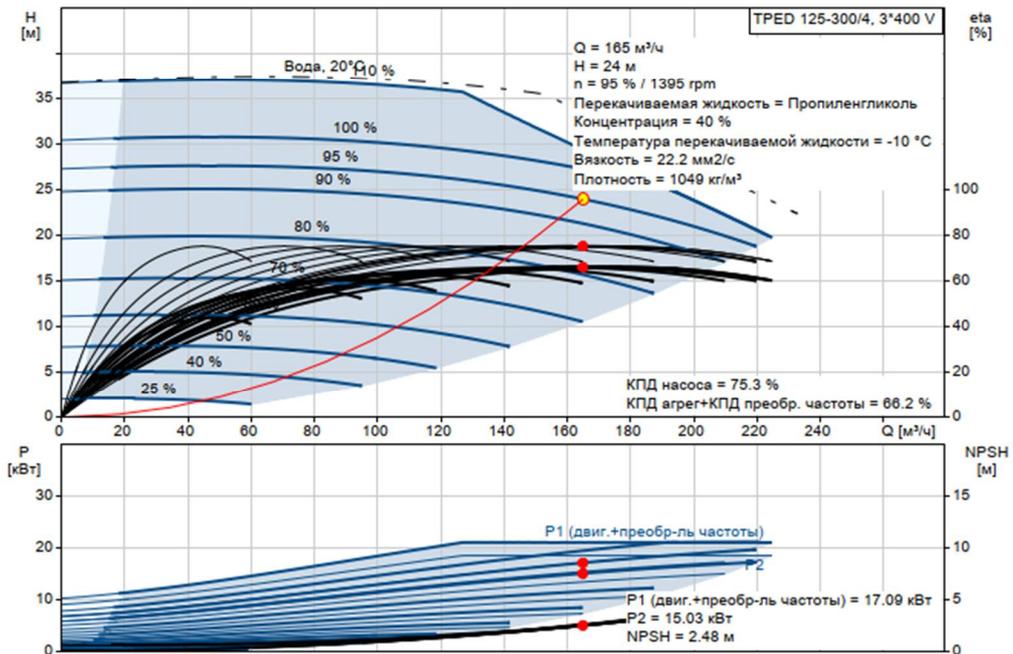


TRPED 125-300/4 S-A-F-A-BQQE-PX3

Сдвоенные одноступенчатые насосы типа "ин-лайн" со встроенным частотным преобразователем и датчиком

Внимание! Фотография продукта может отличаться от существующего.

Условия эксплуатации		Насос		Двигатель	
Расход:	165 м³/ч	Макс. давление при заданной темп-ре:	16 бар / 120 °C	Номинальное напряжение:	380-480 В
Напор:	24 м	Диапазон температур жидкости:	-25 .. 120 °C	Частота питающей сети:	50 Hz
Эффективн.:	66.2 %	Максимальная температура окружающей среды:	40 °C	Класс защиты:	IP55
Жидкость:	Пропиленгликоль	Уплотнение вала:	BQQE	Класс изоляции:	F
Температура:	-10 °C	Номер продукта:	98742623	Защита двигателя:	Да
NPSH потребн.:	2.48 м			Тип электродвигателя:	180MA
Удельная масса:	1.051			КПД 1/1:	91.2 %



1/10

Рисунок 5.6.10 – Технические характеристики подобранного насоса

Описание	Значение
Общие сведения:	
Наименование продукта:	TPED 125-300/4 S-A-F-A-BQQE-PX3
№ продукта:	98742623
EAN код:	5712600813441
Цена без НДС:	UER 16183
Технические данные:	
Скорость насоса, при которой рассчитаны его характеристики:	1470 об/м
Текущий рассчитанный расход:	165 м³/ч
Общий напор насоса:	24 м
Максимальный напор:	300 дм
Текущий диаметр рабочего колеса:	295 мм
Код торцевого уплотнения вала:	BQQE
Допуски по рабочим хар-кам:	ISO9906:2012 3B
Тип исполнения:	A
Материалы:	
Корпус насоса:	Чугун
Материал корпуса насоса:	EN-GJL-250
Корпус насоса:	ASTM class 35
Рабочее колесо:	Чугун
Рабочее колесо, EN/DIN:	EN-GJL-200
Рабочее колесо, AISI/ASTM:	ASTM class 30
Код материала:	A
Монтаж:	
Диапазон температуры окружающей среды:	-20 .. 40 °C
Макс. рабочее давление:	16 бар
Макс. давление при заданной темп-ре:	16 бар / 120 °C
Стандарт трубного присоединения:	DIN
Диаметр трубного присоединения:	DN 125
Допустимое давление:	PN 16
Монтажная длина:	800 мм
Размер фланца электродвигателя:	FF300
Код присоединения:	F
Жидкость:	
Рабочая жидкость:	Пропиленгликоль
Диапазон температур жидкости:	-25 .. 120 °C
Концентрация:	40 %
Температура перекачиваемой жидкости:	-10 °C
Плотность:	1049 кг/м³
Кинематическая вязкость:	22.2 мм²/с
Данные электрооборудования:	
Тип электродвигателя:	180MA
Класс энергоэфф-ти:	IE2
Номинальная мощность - P2:	18.5 кВт
Частота питающей сети:	50 Hz
Номинальное напряжение:	3 x 380-480 В
Номинальный ток:	37.0-30.0 А
Сos фи - характеристика мощности:	0.91-0.88
Номинальная скорость:	240-1750 об/м
Энергоэффективность:	IE2 91,2%

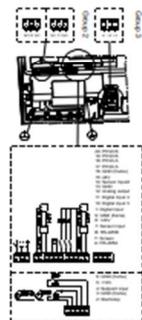
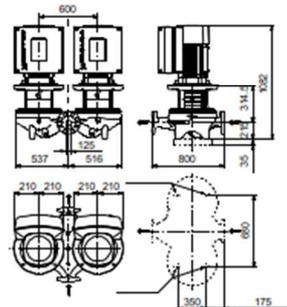
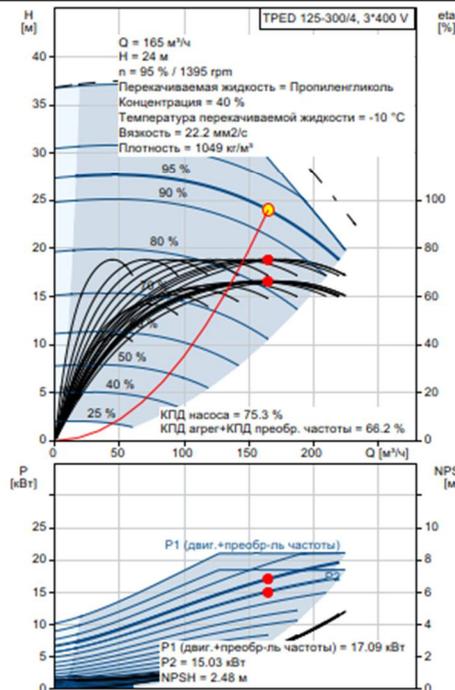


Рисунок 5.6.11 – Результаты подбора насоса

Контрольные вопросы и задания

1. Методы формирования исходной информации для расчета и подбора отдельных видов оборудования.
2. Система ограничений при подборе оборудования и трубопроводов.
3. Особенности резервирования при подборе различных видов оборудования.

6 МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ИЗУЧЕНИЮ КУРСА "КОМПЬЮТЕРНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СИСТЕМ"

Эффективное освоение дисциплины по практическим занятиям требуют базовых знаний по специальным дисциплинам. При выполнении работ магистрантам рекомендуется использовать не только специальную литературу, но и материалы, представленные в Интернете, периодическую литературу, материалы российских и международных конференций по тематике работ. Цель практических занятий – закрепление теоретического материала и выработка у магистрантов навыков по практическим аспектам ведения проектных и теоретических исследований. На первом занятии преподаватель доводит до магистрантов порядок и график проведения занятий, максимальное количество баллов, которое может набрать каждый учащийся по текущему занятию в соответствии с принятой в Университете системой оценок.

Практические занятия по дисциплине проводятся следующим образом:

- 1) вводный материал преподавателя (тема, цель занятия, основные вопросы, выдача заданий и вспомогательных материалов);
- 2) выполнение работ магистрантами согласно теме практического занятия;
- 3) беглый опрос в процессе выполнения работы;
- 4) анализ результатов работы магистрантов;
- 5) разбор типовых ошибок, объявление оценок.

Часть практических занятий посвящена приобретению навыков поиска научно-технической информации с использованием ресурсов сети Интернет и электронных ресурсов, а также использованию прикладных программ для представления, хранения и обработки информации, полученной в ходе проектных и теоретических исследований. На этих занятиях преподаватель объясняет основные приёмы работы, каждый магистрант при этом выполняет своё индивидуальное задание.

По результатам работы на практических занятиях следует выставлять оценку (по каждому занятию) с учётом уровня предварительной самостоятельной подготовки магистранта к текущему занятию. В конце текущего занятия указывается на необходимость подготовки магистранта к следующему практическому занятию, указываются методы подготовки, виды информационных материалов.

Самостоятельная работа магистрантов по дисциплине организуется следующим образом:

- проведение литературного обзора по заданной тематике (включая поиск данных в Интернете и других источниках);
- анализ и обобщение данных литобзора;
- выполнение заданий по практическим и лабораторным занятиям, домашних расчётных заданий;
- выполнение расчётно-графической работы по заданной теме;
- составление отчёта по РГР с учётом требований к проектной документации.

Преподавание дисциплины ведётся с применением следующих видов образовательных технологий:

Информационные технологии: использование электронных образовательных ресурсов при подготовке к лекциям и практическим занятиям.

Работа в команде: совместная работа магистрантов в группе при выполнении практических работ.

Проблемное обучение: стимулирование магистрантов к самостоятельному приобретению знаний, необходимых для решения конкретной проблемы.

Контекстное обучение: мотивация магистрантов к усвоению знаний путём выявления связей между конкретным знанием и его применением. При этом знания, умения, навыки даются не как предмет для запоминания, а в качестве средства решения профессиональных задач.

Обучение на основе опыта: активизация познавательной деятельности магистранта за счёт ассоциации и собственного опыта с предметом изучения.

Междисциплинарное обучение: использование знаний из разных областей, их группировка и концентрация в контексте решаемой задачи.

Опережающая самостоятельная работа: изучение магистрантами нового материала до его изучения в ходе аудиторных занятий.

6.1 Формы контроля освоения дисциплины

Контроль освоения дисциплины производится в соответствии с Положением о проведении текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации студентов Университета ИТМО и Положением

о балльно-рейтинговой системе, используемой при проведении текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации студентов Университета ИТМО. Текущая и промежуточная аттестация магистрантов производится в дискретные временные интервалы лектором и преподавателем, ведущими практические занятия по дисциплине в следующих формах:

- тестирование;
- выполнение заданий на практических занятиях (контроль осуществляется с использованием различных оценочных средств);
- выполнение и защита расчётно-графической работы, СРО;
- экзамен;
- отдельно оцениваются личностные качества магистранта (аккуратность, исполнительность, инициативность) – работа у доски, своевременная сдача тестов, письменных домашних заданий, отчётов.

6.2 Оценочные средства и методики их применения

Оценивание уровня учебных достижений магистранта осуществляется в виде текущего контроля и промежуточной аттестации в соответствии с Положением о проведении текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации студентов Университета ИТМО. Фонды оценочных средств, позволяющие оценить результаты образования (РО) по данной дисциплине, включают в себя:

- комплект типовых заданий по темам практических занятий;
- расчётно-графические работы.

Итоговой формой контроля знаний, умений и навыков по дисциплине является экзамен. Необходимым и достаточным условием выставления положительной оценки является системное изложение полученных знаний в устной и письменной или графической форме при тестировании, выполнении письменных заданий, сдача и защита практических, расчётно-графических работ, а также проявление познавательной активности к инновациям.

Задания для расчётно-графической работы, расчётных заданий приведены в Приложениях А1-А4.

Контроль успеваемости по дисциплине осуществляется с помощью следующих оценочных средств: расчётно-графическая работа, устный опрос, дискуссия, задача (домашнее задание), промежуточная аттестация.

Расчётно-графическая работа

Программой обучения предусматривается выбор темы исследования, выполнение литературного обзора по выбранной теме, анализ и обработка результатов опубликованных исследований и собственных расчётных

данных, составление отчёта согласно требованиям к проектной документации. Тема расчётно-графической работы выбирается магистрантом из предложенного списка тем или самостоятельно по согласованию с преподавателем. Отчёт магистранта по расчётно-графической работе должен содержать:

- литературный обзор по выбранной теме исследования;
- методику исследований;
- анализ и обобщение результатов опубликованных работ и собственных расчётов магистранта;
- выводы.

Результаты работы сводятся в отчёт на заданную тему исследований, основанных на обзоре литературных, документальных и других источников. Это – краткое изложение в письменном виде содержания и результатов индивидуальной научно-исследовательской деятельности. Отчёт должен быть структурирован и включать разделы: введение, основная часть, заключение, список используемых источников, при необходимости – приложения, содержащие документы, иллюстрации, таблицы, схемы и т.д. Отчёт печатается с использованием компьютера и принтера на одной стороне листа белой бумаги формата А4 и представляется в сброшюрованном виде в папке типа «скоросшиватель».

Оформление отчета производится в следующем порядке:

- титульный лист;
- оглавление;
- введение;
- основная часть, разбитая на разделы и подразделы;
- заключение;
- список использованных источников;
- приложения.

Общий объем расчётно-графической работы не менее 20 страниц. Текст набирается в текстовом редакторе (*Microsoft Word, Writer* или аналогичном), при этом рекомендуется использовать шрифт *Times New Roman Cyr*, размер шрифта – 14 пт, с полуторным межстрочным интервалом. Размеры полей: слева – 3 см, справа, сверху и снизу – 2 см. Изложение текста и оформление отчёта выполняют в соответствии с требованиями ГОСТ 2.105-2019, ГОСТ 7.32-2017. В тексте не допускается сокращение названий, наименований (за исключением общепринятых аббревиатур).

Во введении указывается обоснование актуальности темы работы, постановка целей и формирование задач, краткий обзор литературы и прочих источников информации.

Основная часть отчёта структурируется по разделам и подразделам, количество и названия которых определяются автором. Подбор разделов должен быть направлен на рассмотрение и раскрытие основных положений

выбранной темы; демонстрацию автором навыков подбора, структурирования, изложения и критического анализа материала по конкретной теме; выявление собственного мнения, сформированного на основе работы с источниками и литературой. Обязательными являются ссылки на авторов, чьи позиции, мнения, информация использованы в работе.

Заключение состоит из подведения итогов выполненной работы; краткого и четкого изложения выводов; анализа степени выполнения поставленных во введении задач; обобщения положений, высказанных во введении и основной части.

Список использованных источников к отчёту оформляется в порядке появления ссылок на источники в тексте работы. Обязательно использование не менее 10 отечественных и не менее 2 иностранных источников, опубликованных в последние 5 лет. Обязательно использование интернет-ресурсов, электронных информационных баз данных: Издательство «Лань» Электронно-библиотечная система <http://e.lanbook.com/>; *American Physical Society* <http://publish.aps.org/>; Научная электронная библиотека <http://elibrary.ru/>.

Готовый отчёт представляется в печатном виде и защищается в форме устного доклада по теме исследования с ответами на вопросы аудитории.

При проверке учитываются:

- новизна текста, обоснованность выбора источников;
- содержательность, логичность, аргументированность общих выводов, наличие авторской позиции, самостоятельность оценок и суждений;
- умение анализировать различные источники, извлекать из них исчерпывающую информацию, систематизировать, структурировать и обобщать ее;
- полнота и глубина знаний по теме;
- умение ясно выражать свои мысли в письменной форме, оценка грамотности и культуры изложения, владение терминологией;
- яркость, образность изложения, индивидуальность стиля;
- правильное оформление работы (изложение текста в соответствии с разработанным планом, грамотное оформление цитат и ссылок, библиографии, титульного листа и т. д.), соблюдение требований к объёму отчёта;
- наличие приложений.

Во время защиты работы учитывается манера устного изложения материала и умение отвечать на вопросы.

Оценка «незачет» выставляется, если работа не представлена, тема работы не раскрыта, обнаруживается существенное непонимание проблемы. Максимальный балл ставится, если выполнены все требования к

написанию РГР. Оценка снижается, если имеются существенные отступления от требований.

Критерии оценивания:

- соответствие содержания заявленной теме, отсутствие в тексте отступлений от темы – 1 балл;
- соответствие целям и задачам дисциплины – 1 балл;
- логичность и последовательность в изложении материала – 1 балл;
- способность к работе с литературными источниками, интернет-ресурсами, справочной и энциклопедической литературой – 0,5 балла;
- объем исследованной литературы и других источников информации – 0,5 балла;
- правильность оформления (соответствие стандарту, структурная упорядоченность, ссылки, цитаты, таблицы и т.д.) – 0,5 балла;
- соблюдение объема, шрифтов, интервалов (соответствие оформления правилам компьютерного набора текста) – 0,5 балла.

Устный опрос

Для контроля знаний студентов по отдельным темам предлагаются следующие вопросы:

1. Основные понятия о проекте и процессе компьютерного проектирования.
2. Состав проекта системы холодоснабжения.
3. Методы хранения и передачи информации с помощью современных технологий.
4. Разделы проектов.
5. Базы данных, методы их формирования.
6. Формирование, хранение и передача графической информации.
7. Программное обеспечение, основные понятия.
8. Холодильная установка как объект моделирования.
9. Иерархический принцип построения модели объекта.
10. Структурная схема холодильной установки.
11. Системы автоматизированного проектирования мобильных и стационарных холодильных систем.
12. Методы адаптивного управления на базе компьютерных технологий.
13. Методы повышения эффективности систем за счет использования средств автоматизации и компьютерных технологий.
14. Особенности использования компьютерных технологий при проектировании мобильных холодильных систем
15. Методы математического моделирования отдельных видов оборудования.
16. Методы локальной оптимизации отдельных подсистем

17. Виды программного обеспечения для решения задач оптимизации параметров систем.
18. Особенности структурной оптимизации холодильных систем.
19. Анализ влияния схемных решений.
20. Оптимизация трубопроводов.
21. Особенности проектирования холодильного технологического оборудования.
22. Анализ методов адаптивного управления в процессе эксплуатации.
23. Особенности использования методов нелинейного программирования в процессах оптимизации холодильных систем.

Шкала оценивания и критерии оценки:

Критерии оценки	Баллы обучающегося	Минимальное количество баллов	Максимальное количество баллов
Уровень усвоения материала, предусмотренного программой		1,2	2,5
Качество ответа (его общая композиция, логичность, убежденность, общая эрудиция)		0,6	0,8
Ответы на вопросы: полнота, аргументированность, убежденность, умение использовать ответы на вопросы для более полного раскрытия содержания вопроса		0,5	0,7
Деловые и волевые качества докладчика: ответственное отношение к работе, стремление к достижению высоких результатов, готовность к дискуссии, контактность		0,7	1,0
Итого:		3	5

Зачтено (отлично) – 5 баллов;

Зачтено (хорошо) – 4 балла;

Зачтено (удовлетворительно) – 3 балла;

Не зачтено (неудовлетворительно) – 2 и менее баллов

Дискуссия

Практические и семинарские занятия разделов 1 и 2 могут проходить в виде дискуссии.

При подготовке к занятию, которое будет проходить в форме дискуссии по предложенным преподавателем темам, студенту необходимо подготовить презентацию по теме доклада в размере не более 5-8 слайдов, продолжительность доклада – 5-10 минут. Презентация должна содержать материал, относящийся к тематике рассматриваемого вопроса. По окончании доклада происходит коллективное обсуждение предложенного материала.

Перечень дискуссионных тем:

Тема 1. Компьютерное проектирование. Понятие.

Тема 2. Компьютерное проектирование на базе математического моделирования.

Тема 3. Особенности использования методов компьютерного проектирования в холодильной технике.

Тема 4. Методы хранения и передачи информации.

Тема 5. Холодильная установка как объект моделирования.

Тема 6. Языки программирования, сравнительный анализ.

Тема 7. Алгоритмы. Понятие, особенности, методы описания.

Тема 8. Сравнительный анализ методов обработки статистической информации.

Тема 9. Анализ методов оптимального адаптивного управления.

Тема 10. Методы повышения эффективности холодильных систем с помощью компьютерных технологий.

Шкала оценивания и критерии оценки:

Критерии	Минимальный ответ, 0 баллов	Изложенный, раскрытый ответ, 15 баллов	Законченный, полный ответ, 18 баллов	Образцовый, примерный, достойный подражания ответ, 25 баллов	Баллы обучающегося
<i>Раскрытие проблемы</i>	Проблема не раскрыта. Отсутствуют выводы.	Проблема раскрыта не полностью. Выводы не сделаны и/или выводы не обоснованы.	Проблема раскрыта. Проведен анализ проблемы без привлечения дополнительной литературы. Не все выводы сделаны и/или обоснованы.	Проблема раскрыта полностью. Проведен анализ проблемы с привлечением дополнительной литературы. Выводы обоснованы.	
<i>Представление</i>	Представляемая информация логически не связана. Не использованы профессиональные термины.	Представляемая информация не систематизирована и/или не последовательна. Использован 1-2 профессиональных термина.	Представляемая информация систематизирована и последовательна. Использовано более 2 профессиональных терминов.	Представляемая информация систематизирована, последовательна и логически связана. Использовано более 5 профессиональных терминов.	
<i>Оформление</i>	Не использованы информационные технологии (например, PowerPoint). Больше 4 ошибок в	Использованы информационные технологии (например, PowerPoint). 3-4 ошибки в	Использованы информационные технологии (например, PowerPoint). Не более 2 ошибок в	Широко использованы возможности информационных технологий (например, PowerPoint).	

	представляемой информации.	представляемой информации.	представляемой информации.	Отсутствуют ошибки в представляемой информации.	
<i>Ответы на вопросы</i>	Ответы на вопросы не получены.	Только ответы на элементарные вопросы.	Ответы на вопросы полные и/или частично полные.	Ответы на вопросы полные с приведением примеров и/или пояснений.	
Итого баллов:					

90-100 баллов – оценка «отлично»;

72-90 баллов – оценка «хорошо»;

60-72 баллов – оценка «удовлетворительно»;

0-60 баллов – оценка «неудовлетворительно»

Задача (домашнее задание)

Домашнее задание выполняется индивидуально, представляется в письменной форме и должно удовлетворять следующим требованиям: в работе указывается ФИО студента, номер группы, условие каждого задания, основные этапы решения, необходимые иллюстрации, характеристики, вывод.

Темы и необходимые объемы исходных данных расчетных работ магистранты выбирают самостоятельно исходя из предлагаемого преподавателем перечня холодильного оборудования, подлежащего расчету или оптимальному проектированию (компрессоры различного исполнения, конденсаторы, испарители, теплообменное оборудование и т.д.).

Требования к содержанию и структуре расчетных работ:

1. Объем работ: не регламентируется.
2. Используемые в работе источники должны быть опубликованы не ранее 1980 г.
3. Обязательно наличие титульного листа, введения, описания методики расчета, анализа результатов расчета с использованием существующего методического и программного обеспечения (фирм-производителей оборудования и др.), заключения, списка использованных источников.

Отчет по расчетной работе представляется в печатном виде и соответствующем формате. Защита отчета проходит в форме доклада и ответов на вопросы преподавателя.

В случае если оформление отчета и доклад обучающегося во время защиты соответствуют указанным требованиям, обучающийся получает максимальное количество баллов.

Основаниями для снижения количества баллов в диапазоне являются:

- небрежное выполнение расчета;
- низкое качество графического и расчетного материала.

Отчет не может быть принят и подлежит доработке в случае:

- отсутствия необходимых разделов,
- отсутствия необходимого графического материала,
- некорректности результатов.

В случае, если оформление отчета и доклад обучающегося во время защиты соответствуют указанным требованиям, обучающийся получает максимальное количество баллов.

Шкала оценивания и критерии оценки:

«5» (отлично): выполнены все разделы работы, обучающийся четко и без ошибок ответил на все контрольные вопросы.

«4» (хорошо): выполнены все разделы работы; обучающийся ответил на все контрольные вопросы с замечаниями.

«3» (удовлетворительно): выполнены все задания работы с замечаниями; обучающийся ответил на все контрольные вопросы с замечаниями.

«2» (не зачтено): обучающийся не выполнил или выполнил неправильно задания работы; обучающийся ответил на контрольные вопросы с ошибками или не ответил на контрольные вопросы.

Промежуточная аттестация

Промежуточная аттестация по дисциплине осуществляется в форме экзамена. Экзамен проводится в устной форме. На подготовку к ответу отводится 60 минут. Обучающийся получает билет с экзаменационными вопросами. Дополнительные вопросы могут задаваться по темам пропущенных занятий. При подготовке к ответу обучающийся может излагать тезисы своего ответа на бланке, на котором необходимо указать ФИО обучающегося, номер билета, номер группы.

Примерный перечень вопросов к экзамену:

1. Основные понятия о проекте.
2. Состав проекта предприятия. Разделы проекта.
3. Методы хранения и передачи проектной информации с помощью современных технологий.
4. Стадийность проектирования. Алгоритм двухстадийного проектирования.
5. Особенности проектирования изделий серийного изготовления.
6. Стадии разработки изделий согласно ЕСКД.
7. Определение САПР. Виды обеспечения САПР.
8. Базы данных, методы их формирования.
9. Формирование, хранение и передача графической информации.
10. Классификация видов математических моделей.

11. Система связей математических моделей и информационных потоков.
12. Основные этапы математического моделирования систем холодоснабжения.
13. Описание схемы холодильной установки с помощью "списка связей".
14. Организация последовательного расчета основного и вспомогательного контуров системы ХС.
15. Определение понятия "функция цели".
16. Основные показатели эффективности системы холодоснабжения.
17. Анализ характера изменения затрат на горизонте расчета системы.
18. Определение понятия "структурной оптимизации".
19. Определение понятия "параметрической оптимизации".
20. Исходная информация при реализации процессов проектирования. Графики изменения тепловых нагрузок.
21. Методы оптимизации целевой функции.
22. Алгоритм структурно-параметрического синтеза холодильных установок.
23. Список основных параметров оптимизации систем холодоснабжения.
24. Описание процедуры формирования математической модели вспомогательного охлаждающего комплекса.
25. Основные положения структурно-параметрической оптимизации трубопроводных подсистем.
26. Алгоритм формирования процедуры оптимизации системы холодоснабжения.
27. Сравнительный анализ результатов предпроектных исследований.
28. Компьютерное проектирование на базе математического моделирования объектов холодоснабжения.
29. Холодильная установка как объект моделирования.
30. Системы автоматизированного проектирования мобильных и стационарных холодильных систем.
31. Методы адаптивного управления на базе компьютерных технологий.
32. Методы математического моделирования отдельных видов оборудования.
33. Методы локальной оптимизации отдельных подсистем.
34. Виды программного обеспечения для решения задач оптимизации параметров систем.
35. Особенности структурной оптимизации холодильных систем.
36. Анализ влияния схемных решений.
37. Оптимизация трубопроводов

38. Особенности проектирования ХТО.

39. Особенности использования методов нелинейного программирования в процессах оптимизации холодильных систем.

Порядок формирования билета к экзамену

Билет включает два вопроса – по одному из каждого раздела – из примерного перечня вопросов, из разных тем, дополнительные вопросы могут задаваться по темам пропущенных занятий.

Пример билета к зачету № _____

1. Состав проекта предприятия Разделы проекта.
2. Анализ влияния схемных решений.

Шкалы оценивания и критерии оценки:

Критерии оценки	Баллы обучающегося	Минимальное количество баллов	Максимальное количество баллов
Уровень усвоения материала, предусмотренного программой		10	20
Умение выполнять задания, предусмотренные программой		10	20
Уровень знакомства с литературой, предусмотренной программой		10	15
Качество ответа (его общая композиция, логичность, убежденность, общая эрудиция)		10	15
Ответы на вопросы: полнота, аргументированность, убежденность, умение использовать ответы на вопросы для более полного раскрытия содержания вопроса		10	15
Деловые и волевые качества докладчика: ответственное отношение к работе, стремление к достижению высоких результатов, готовность к дискуссии, контактность		10	15
Итого баллов:		60	100

Оценка	Минимальное количество баллов	Максимальное количество баллов
«5» (отлично)	90	100
«4» (хорошо)	74	89,99
«3» (удовлетворительно)	60	73,99
«2» (неудовлетворительно)	0	59,99

Знания, умения и навыки обучающихся при промежуточной аттестации **в форме экзамена** определяются оценками «отлично», «хорошо», «удовлетворительно», «неудовлетворительно».

«Отлично» – обучающийся глубоко и прочно усвоил весь программный материал, исчерпывающе, последовательно, грамотно и логически стройно его излагает, не затрудняется с ответом при видоизменении задания, свободно справляется с задачами и практическими

заданиями, правильно обосновывает принятые решения, умеет самостоятельно обобщать и излагать материал, не допуская ошибок.

«Хорошо» – обучающийся твердо знает программный материал, грамотно и по существу излагает его, не допускает существенных неточностей в ответе на вопрос, может правильно применять теоретические положения и владеет необходимыми умениями и навыками при выполнении практических заданий.

«Удовлетворительно» – обучающийся усвоил только основной материал, но не знает отдельных деталей, допускает неточности, недостаточно правильные формулировки, нарушает последовательность в изложении программного материала и испытывает затруднения в выполнении практических заданий.

«Неудовлетворительно» – обучающийся не знает значительной части программного материала, допускает существенные ошибки, с большими затруднениями выполняет практические задания, задачи.

6.3 Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

а) Литература:

1. Голубева, Н.В. Математическое моделирование систем и процессов [Электронный ресурс] : учеб. пособие — Электрон. дан. — Санкт-Петербург : Лань, 2016. — 192 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/76825>. — Загл. с экрана.

2. Онстот, С. AutoCAD ® 2015 и AutoCAD LT ® 2015. Официальный учебный курс / С. Онстот ; перевод с английского С. П. Ивженко. — Москва : ДМК Пресс, 2015. — 416 с. — ISBN 978-5-97060-314-7. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/69960> . — Режим доступа: для авториз. пользователей. — Загл. с экрана.

3. Комарова, Н.А. Холодильные установки. Основы проектирования. [Электронный ресурс] — Электрон. дан. — Кемерово : КемГИПП, 2012. — 368 с. — Режим доступа: <http://e.lanbook.com/book/4606> — Загл. с экрана.

4. Подбор и расчет основных элементов одноступенчатой парокомпрессионной холодильной машины: Учебно-методическое пособие / Мизин В.М., Татаренко Ю.В.- СПб.: Университет ИТМО; ИХиБТ, 2015. – 63 с. http://books.ifmo.ru/book/1527/podbor_i_raschet_osnovnyh_elementov_odnostupenchatoy_parokompressionnoy_holodilnoy_mashiny.htm.

5. Татаренко Ю.В. Тепловые расчеты циклов холодильных машин: Учебно-методическое пособие – Санкт-Петербург: Университет ИТМО, 2018. – 62 с. — Режим доступа: http://books.ifmo.ru/book/2164/teplovye_raschety_ciklov_holodilnyh_mashin:_uchebno-metodicheskoe_posobie.htm.

6. Петров Е.Т. Основы научных исследований в низкотемпературной технике : Учебно-методическое пособие – Санкт-Петербург: Университет ИТМО, 2020. – 74 с. — Режим доступа: <https://books.ifmo.ru/file/pdf/2642.pdf>.

7. Петров Е.Т., Круглов А.А. Компьютерное проектирование низкотемпературных систем : Учебно-методическое пособие – Санкт-Петербург: Университет ИТМО, 2021. – 125 с.

б) программное обеспечение, интернет-ресурсы, электронные библиотечные системы:

1. Математический пакет *Matlab & Simulink*;

2. Текстовый редактор *MS Word*;

3. Текстовый редактор *Writer*;

4. Издательская система *LATEX*;

5. Википедия: свободная энциклопедия <http://ru.wikipedia.org/>

6. Система дистанционного обучения Университета ИТМО
<http://de.ifmo.ru/>

7. Научная электронная библиотека *eLibrary.ru* –
<http://elibrary.ru/defaultx.asp>

8. Электронно-библиотечная система «Издательство «Лань»
<http://e.lanbook.com/>

9. Интернет-газета Холодильщик.RU
<http://www.holodilshchik.ru/>

10. Прикладное программное обеспечение фирм-производителей холодильного оборудования.

Журналы:

1. «Холодильная техника»

2. «Холодильный бизнес»

3. «Вестник Международной академии холода»

4. «Империя Холода»

5. Научный журнал Университета ИТМО. Серия «Холодильная техника и кондиционирование»

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Microsoft – официальная страница [Электронный ресурс] — Режим доступа: <https://www.microsoft.com/ru-ru/> — Заглавие с экрана.
2. Программы Autodesk [Электронный ресурс] — Режим доступа: <https://www.autodesk.ru/products> — Заглавие с экрана.
3. Российское инженерное ПО для проектирования, производства и бизнеса [Электронный ресурс] — Режим доступа: <https://ascon.ru/> — Заглавие с экрана.
4. Программное обеспечение PTC [Электронный ресурс] — Режим доступа: <https://www.ptc.com/ru/products/all> — Заглавие с экрана.
5. CADMATIC Process & Industry [Электронный ресурс] — Режим доступа: <https://www.cadmatic.com/ru/process-and-industry/> — Заглавие с экрана.
6. Ansys CFX. Динамика жидкостей и газов [Электронный ресурс] — Режим доступа: <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-cfx> — Заглавие с экрана.
7. Ansys Fluent. Расчет течений [Электронный ресурс] — Режим доступа: <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-fluent> — Заглавие с экрана.
8. Simcenter STAR-CCM+. Siemens Digital Industries Software [Электронный ресурс] — Режим доступа: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/products/simcenter/STAR-CCM.html> — Заглавие с экрана.
9. Бусленко Н.П. Моделирование сложных систем. — М.: Наука, 1978. — 399 с.
10. Месарович М., Такахара Я. Общая теория систем: математические основы / Пер. с англ.; Под ред. С.В. Емельянова. — М.: Мир, 1978. — 311 с.
11. Попырин Л.С. и др. Автоматизация математического моделирования теплоэнергетических установок. — М.: Наука, 1981. — 236 с.
12. Руднев В.Е. и др. Формирование технических объектов на основе системного анализа. — М.: Машиностроение, 1991. — 320 с.; кл. ISBN 5-217-01346-X.
13. Оносовский В.В. Моделирование и оптимизация холодильных установок : Учеб. пособие. — Л.: Изд-во Ленинградского университета, 1990. — 208 с. ISBN 5-288-00488-9.
14. Белов В.В. и др. Теория графов : Учебное пособие для вузов. — М.: Высш. шк., 1986. — 392 с.
15. Кристофидес Н. Теория графов. Алгоритмический подход: Пер. с англ. — М.: Мир, 1978. — 432 с.
16. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов. Утверждено Минэкономки России, Минфин

России, Госстрой России, № ВК477, 21.06.1999 г., — М.: Экономика, — 2000 г.

17. Лазарев И.А. Композиционное проектирование сложных агрегатных систем. — М. : Радио и связь, 1986. — 311 с.

18. Петров, Е.Т. Особенности автоматизированного проектирования систем хладоснабжения предприятий большой мощности [Текст] / Е.Т. Петров // Известия СПбГУНиПТ. — СПб. — 2004. — N 1(6). — С. 20-26.

19. Петров Е.Т., Лукьянова Т.А. Обработка статистической информации по надежности отдельных элементов компрессорных станций. / Деп. сб. "Новые исследования холодильных машин и установок". — ЦИНТИхимнефтемаш, — № 1, 1985.

20. E. S. Kurylyov, E. T. Petrov and Goverdovsky. Computer optimization of a turbocompression plant with air-cooled condensers. International Journal of Refrigeration. v. 4, N5, 1981.

21. Химмельблау С. Нелинейное программирование. — М.: Мир, 1998.

22. Петров Е.Т., Круглов А.А., Опалихин А.Ф. Особенности экспериментального и предпроектного исследования камер фрукто-овощехранилищ с регулируемой газовой средой // Вестник МАХ, 2016, — №3. — с. 62–67.

23. Петров Е. Т., Михновская Е. Л. Оптимизация холодильных установок в процессе автоматизированного проектирования. // Сборник научных трудов "Автоматизированное проектирование трубопроводных систем нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств". — ЦНИИЭнефтехим, — М., 1982.

24. Петров Е.Т., Круглов А.А. Особенности проектирования холодильных установок с промежуточным хладоносителем. // Материалы международной научно-технической конференции "Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке", — Санкт-Петербург, — 2001.

25. Петров Е.Т., Калачева И.Г. Оптимизация разветвленных трубопроводов холодильных установок // Сборник научных трудов "Организационно-методические проблемы разработки и внедрения САПР в проектных организациях МНХП СССР". — ЦНИИТЭнефтехим, — М., 1989.

26. Курылев Е. С., Петров Е.Т., Михновская Е.Л. Автоматизированное проектирование холодильных установок // Холодильная техника, — 1981. — №5.

27. Бараненко, А.В. Холодильные машины: учеб. для студ. вузов спец. «Техника и физика низких температур» / А.В. Бараненко, Н.Н. Бухарин, В.И. Пекарев, И.А. Сакур, Л.С. Тимофеевский; под общ. ред. Л.С. Тимофеевского. — 2-е изд., перераб. и доп. — СПб.: Политехника, 2006. — 944 с.: ил. ISBN 5-7325-0792-2.

28. Пекарев, В.И. Определение термодинамической эффективности цикла одноступенчатой холодильной машины [Электронный ресурс] : учеб.-метод. пособие / В.И. Пекарев, В.М. Мизин. — Электрон. дан. — Санкт-Петербург : НИУ ИТМО, 2014. — 46 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/70944>. — Загл. с экрана.

29. Татаренко Ю.В. Тепловые расчеты циклов холодильных машин: Учебно-методическое пособие – Санкт-Петербург: Университет ИТМО, 2018. – 62 с. — Режим доступа: http://books.ifmo.ru/book/2164/teplovye_raschety_ciklov_holodilnyh_mashin:_uchebno-metodicheskoe_posobie.htm

30. Теплообменные аппараты, приборы автоматизации и испытания холодильных машин: справочник / Под ред. А.В. Быкова. — М.: Легкая и пищевая промышленность, 1984. — 248 с.

31. CoolPack v1.50 : Программное обеспечение [Электронный ресурс]. – Прикладная прогр. (12,0 МБ). – IPU & Department of Mechanical Engineering Technical University of Denmark, 2012. – Режим доступа: <https://www.ipu.dk/products/coolpack/>. – Заглавие с экрана.

32. Bitzer Software v6.16.0 : Программное обеспечение [Электронный ресурс]. – Прикладная прогр. (54,4 МБ). – Bitzer Kühlmaschinenbau GmbH, 2020. / Bitzer Kühlmaschinenbau GmbH. — Режим доступа : https://www.bitzer.de/shared_media/files/BitzerSetup_6-16-0-2522.exe. — Заглавие с экрана.

33. ВАС Selection Software версия 0.7.11 : Программное обеспечение [Электронный ресурс]. – Прикладная прогр. (12,4 МБ). – Baltimore Aircoil International — Режим доступа: <https://s2q.baltimoreaircoil.be/s2q/s2q-web/selections/productgroups.do?command=display> . — Заглавие с экрана.

34. Güntner Product Calculator версия 2020.8-214 : Программное обеспечение [Электронный ресурс]. – Прикладная прогр. (66,6 МБ). – Güntner GmbH — Режим доступа: <http://www.guentner.ru/nou-khau/product-calculator-gpc/gpc-software/> . — Заглавие с экрана.

35. Coolselector®2 версия 4.4.2 : Программное обеспечение [Электронный ресурс]. – Прикладная прогр. (86,0 МБ). – Danfoss systems — Режим доступа: <https://coolselector.danfoss.com/Coolselector2/setup.exe> . — Заглавие с экрана.

36. К-PROJECT версия 2.0 : Программное обеспечение [Электронный ресурс]. – Прикладная прогр. (7,1 МБ). – ООО "К-Флекс" — Режим доступа: https://www.k-flex.ru/wp-content/uploads/program/k-project_2.0.zip . — Заглавие с экрана.

37. Grundfos Product Center версия 1.60.08 : Программное обеспечение [Электронный ресурс]. – Прикладная прогр. (868,6 МБ). – Grundfos Management A/S — Режим доступа: <https://product-selection-classic.grundfos.com/front-page.html> . — Заглавие с экрана.

38. Теоретические основы гидравлики [Электронный ресурс] / — Электрон. дан. — ООО "Грундфос", 2019. — 64 с. — Режим доступа:

<https://www.grundfos.com/content/dam/local/ru-ru/page-assets/support/documents/book/book-theory-gydrav-70007491-0519.pdf>. — Загл. с экрана.

39. Теория перекачивания жидкостей [Электронный ресурс] / — Электрон. дан. — ООО "Грундфос", 2019. — 44 с. — Режим доступа: <https://www.grundfos.com/content/dam/local/ru-ru/page-assets/support/documents/book/book-pumptheory-91830082-1119.pdf>. — Загл. с экрана.

40. Промышленное насосное оборудование [Электронный ресурс] / — Электрон. дан. — Grundfos Management A/S, 2006. — 176 с. — Режим доступа: <https://www.grundfos.com/content/dam/local/ru-ru/page-assets/support/documents/book/Industry-book-70012579-1106.pdf>. — Загл. с экрана.

41. Петров Е.Т., Тушев К.А. Особенности математической модели холодильной установки с льдогенератором периодического действия в системе аккумуляции холода. Межвузовский сборник научных трудов. Известия СПбГУНиПТ. — СПб., 2004 г. — №1. — с.17–19.

42. Петров Е.Т., Круглов А.А., Рукобратский Н.И. Анализ методов снижения энергопотребления систем холодоснабжения в процессе круглогодичной эксплуатации // Вестник МАХ, — 2015. — №1. — с. 34–38.

43. Гоголин А.А., Медникова Н.М. Перспективы применения испарительных конденсаторов на предприятиях мясной и молочной промышленности. — Холодильная промышленность и транспорт. Обзорная информация. — М.: ЦНИИТЭИ мясомолпром, 1980. — 100 с.

44. Данилова Г.Н. Теплообменные аппараты холодильных установок / Г.Н. Данилова, С.Н. Богданов, О.П. Иванов и др. — 2-е изд., перераб. и доп. — Л.: Машиностроение, 1986. — 303 с.: ил.

Приложение А1

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
"НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИТМО"

ФАКУЛЬТЕТ ЭНЕРГЕТИКИ И ЭКОТЕХНОЛОГИЙ

ЗАДАНИЕ

на расчетно-графическую работу
по курсу «Компьютерное проектирование
низкотемпературных систем»

Сравнительный анализ эффективности холодильных установок
различного схемного исполнения

Вариант № ____ Группа: _____ Студент: _____

Цель работы: Выполнить расчеты и подбор оборудования холодильных установок различного схемного исполнения (3 типа схем), выполнить сравнительный анализ термодинамической и технико-экономической эффективности.

Расчеты выполнить с помощью программных продуктов фирм-изготовителей холодильного оборудования (DANFOSS, BITZER, GEA, GRUNDFOS, GUNTNER и др.).

Таблица А1 – Исходные данные

Вариант	Холодопроизводительность Q_0 , кВт	Температура кипения t_0 , °С	Температура конденсации t_k , °С	Хладагент	Вариант схемы	Тип ПХ	Переохлаждение хладагента Δt_n
1	300	-10	40	R717	1; 2; 3	ВО	5
2	500	-15	40	R717	1;2; 3	ВО	5
3	750	-20	40	R717	1;2; 3	ВО	5
4	1000	-25	40	R404	1; 2; 4	ВО	10
5	1250	-30	40	R404	1; 2; 4	ВО	10
6	1500	-35	40	R407с	1; 2; 4	ВО	10
7	1750	-40	40	R407с	1; 2; 4	ВО	10
8	2000	-45	40	R507	1; 2; 4	ВО	10
9	2250	-50	40	R507	1; 2; 4	ВО	10
10	2500	-10	40	R1234	1;2; 3	ВО	10
11	500	-20	40	R448	1;2; 3	ВО	10

Вариант	Холодопроизводительность Q_0 , кВт	Температура кипения t_0 , °С	Температура конденсации t_k , °С	Хладагент	Вариант схемы	Тип ПХ	Переохлаждение хладагента Δt_n
12	750	-30	40	R448	1;2; 3	ВО	10
13	800	-35	40	R407A	1;2; 3	ВО	15
14	850	-40	40	R407A	1;2; 3	ВО	15
15	900	-45	40	R507	1; 2; 4	ВО	15
16	950	-10	40	R1234	1;2; 3	ВО	10
17	1000	-20	40	R1234	1;2; 3	ВО	10
18	1100	-25	40	R717	1; 2; 4	ВО	10
19	1200	-30	40	R717	1; 2; 4	ВО	10
20	1300	-35	40	R717	1; 2; 4	ВО	10

Пояснения: Схема №1 – схема непосредственного охлаждения с безнасосной подачей жидкости в охлаждающие приборы ;

Схема №2 – схема непосредственного охлаждения с насосной подачей жидкости;

Схема №3 – схема косвенного охлаждения;

Схема №4 – схема с совмещением прямого и обратного циклов (с насосной подачей R744).

Гидравлическое сопротивление в контурах хладагента: на всасывании в компрессор 0,2 бар; на нагнетании компрессора – 0,2 бар.

Гидравлическое сопротивление в воздухоохладителях (ВО) различных схем: Схема №1 – $\Delta p = 0,3$ бар; схема №2 – $\Delta p = 0,5$ бар; схема №3 – $\Delta p = 0,7$ бар; №4 – $\Delta p = 0,7$ бар.

Приложение А2

Таблица планирования результатов обучения по дисциплине

	Модуль 3										Модуль 4										Промежуточная аттестация по дисц-не			
	Текущий контроль по точкам								Рубежный контроль		Текущий контроль по точкам								Рубежный контроль					
	1		2		3		4				1		2		3		4							
	[min]	max	[min]	max	[min]	max	[min]	max	[min]	max	[min]	max	[min]	max	[min]	max	[min]	max	[min]	max				
Устный опрос					+	+	+	+	+	+					+	+					+	+		
Дискуссия	+	+	+	+																				
Выполнение расчетных заданий																								
Экзамен																								

Приложение А3

Задание по гидравлическому расчету контуров с промежуточным хладоносителем

Выполнить гидравлические расчеты двух контуров (см. рисунок 1 и 2) при использовании в качестве хладоносителя водного раствора пропиленгликоля, подобрать насосы фирмы *Grundfos*. Исходные данные для расчета и подбора насоса приведены в таблице А3.

Значения коэффициентов местных сопротивлений приблизительно принять равными:

- а) задвижка $\zeta_z = 0,05$;
- б) фильтр $\zeta_\phi = 4,0$;
- в) обратный клапан $\zeta_{ок} = 1,5$;
- г) отвод 90° $\zeta_o = 1,2$ (3 отвода на всасывании и 3 отвода на нагнетании насоса).

Длины участков $l_5 = l_6 = l_7 = l_8 = 2,5$ м.

В каждой из ветвей разветвлённого участка трубопровода установлены теплообменники с гидравлическим сопротивлением $\Delta p_{T1} = \Delta p_{T2} = \Delta p_{T3} = \Delta p_{T4} = 0,8$ бар.

Считать, что гидравлическое сопротивление каждой ветви l_1, l_2, l_3, l_4 складывается из сопротивления по длине и сопротивления теплообменника, т.е.: $\Delta p_i = \Delta p_{Ti} + \Delta p_{\phi_i}$. При расчёте ветвей разветвлённого участка трубопровода влиянием гидростатических столбов жидкости пренебрегаем.

Определить расходы в отдельных ветвях разветвлённого участка трубопровода, учитывая, что $\Delta p_1 = \Delta p_2 = \Delta p_3 = \Delta p_4$. Определить диаметры труб d_5, d_6, d_7, d_8 .

Определить требуемый напор и подобрать насос фирмы *Grundfos*.

Таблица А3 – Исходные данные для расчета

№ варианта	Тип хладоносителя (концентрация пропиленгликоля)	Объёмный расход насоса, м ³ /ч	Расчётные длина и диаметр трубопровода на всасывании, м/м $l_{вс}/d_{вс}$	Расчётные длина и диаметр трубопровода на нагнетании м/м $l_{нагн}/d_{нагн}$	Высота подъёма Н, м	Номера участка							
						1		2		3		4	
						l_1	d_1	l_2	d_2	l_3	d_3	l_4	d_4
1	45	15,0	5,0/0,1	16,0/0,07	20,0	22,0	0,03	25,0	0,05	26,0	0,05	-	-
2	40	22,0	8,0/0,125	15,0/0,08	25,0	26,0	0,04	28,0	0,05	31,0	0,03	27,0	0,03
3	35	30,0	4,0/0,150	17,0/0,10	15,0	16,0	0,05	17,0	0,07	18,0	0,03	-	-
4	30	25,0	5,0/0,125	18,0/0,08	10,0	12,0	0,03	14,0	0,05	17,0	0,02	18,0	0,03
5	35	35,0	6,0/0,15	19,0/0,1	22,0	26,0	0,07	28,0	0,04	30,0	0,03	23,0	0,02
6	40	40,0	7,0/0,15	10,0/0,125	18,0	21,0	0,02	23,0	0,05	24,0	0,07	20,0	0,05
7	45	50,0	8,0/0,15	12,0/0,125	16,0	17,0	0,03	18,0	0,04	20,0	0,07	22,0	0,08
8	40	58,0	9,0/0,20	15,0/0,15	14,0	15,0	0,07	16,0	0,08	21,0	0,1	-	-
9	35	65,0	10,0/0,20	11,0/0,15	20,0	27,0	0,08	21,0	0,05	22,0	0,07	21,0	0,03
10	30	90,0	14,0/0,25	16,0/0,15	24,0	30,0	0,05	26,0	0,08	23,0	0,07	22,0	0,02
11	30	70,0	15,0/0,020	15,0/0,15	17,0	18,0	0,08	21,0	0,05	22,0	0,07	19,0	0,03
12	35	60,0	13,0/0,20	10,0/0,125	16,0	22,0	0,05	19,0	0,07	23,0	0,08	17,0	0,02
13	40	55,0	12,0/0,20	12,0/0,15	25,0	28,0	0,08	29,0	0,03	31,0	0,07	29,0	0,05
14	45	45,0	15,0/0,15	25,0/0,125	20,0	21,0	0,03	24,0	0,07	27,0	0,05	29,0	0,04
15	40	38,0	9,0/0,15	30,0/0,10	15,0	17,0	0,07	20,0	0,05	21,0	0,03	18,0	0,02

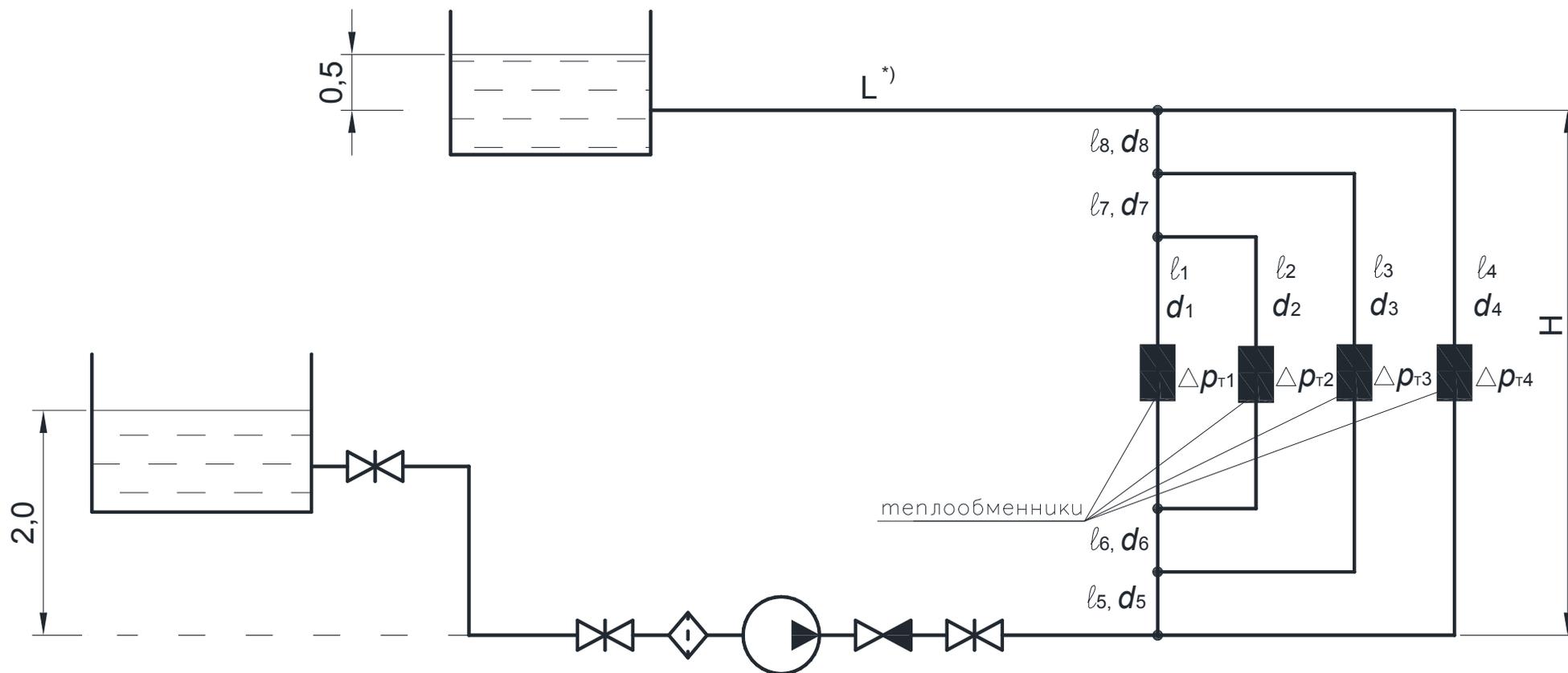


Рисунок А3.1 – Схема открытого контура

*) – длина обратного трубопровода L равна сумме $l_{\text{вс}} + l_{\text{нагн}}$ (см. таблицу А3)

Примечание: Температура хладоносителя: $t_s = \text{минус } 4^\circ\text{C}$

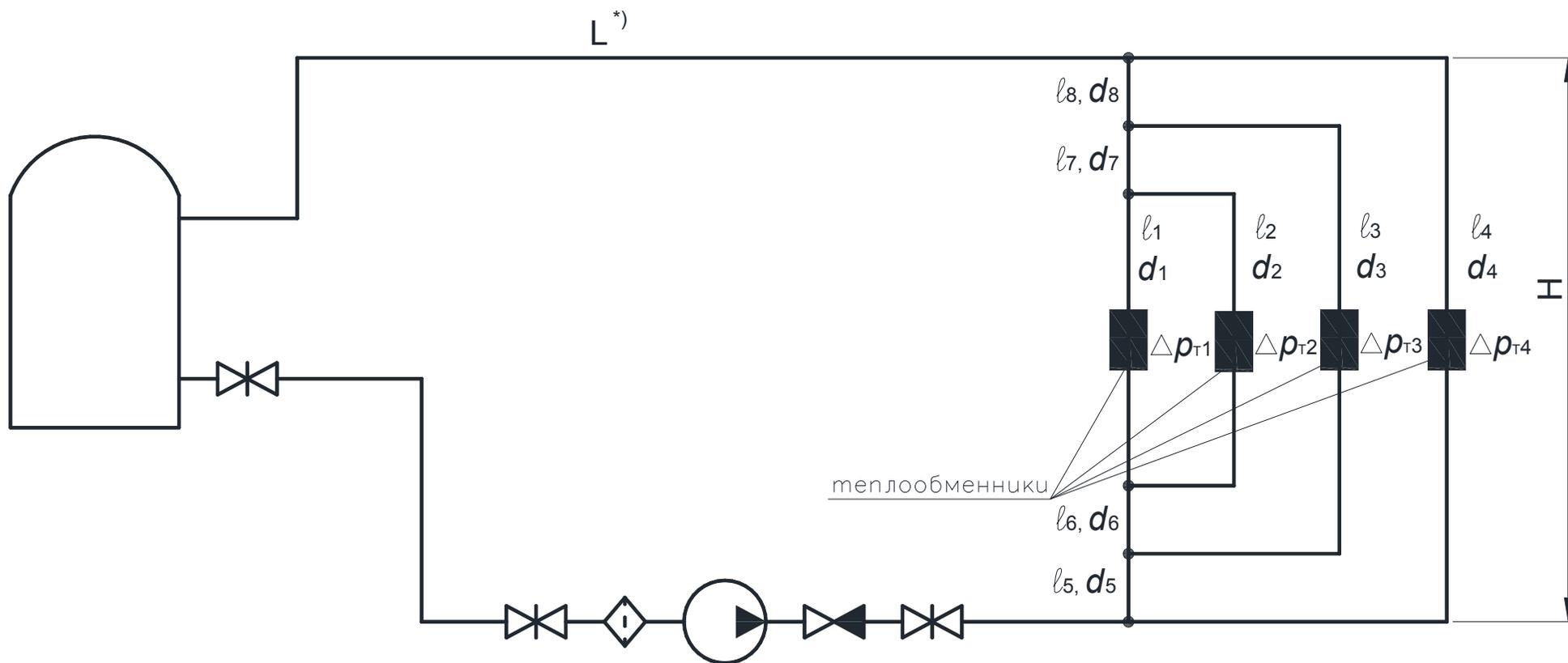


Рисунок А3.2 – Схема закрытого контура

*) – длина обратного трубопровода L равна сумме $l_{\text{вс}} + l_{\text{нагн}}$ (см. таблицу А3)

Примечание: Температура хладоносителя: $t_s = \text{минус } 4^\circ\text{C}$

Приложение А4

Домашнее задание (задача)

Задача №1

Проанализировать характер изменения затрат (капитальных и эксплуатационных) при изменении скорости потока на участках магистрального трубопровода в диапазоне $2,5 \geq W \geq 0,5$ м/с (принимать одинаковой для всех участков).

Температура хладоносителя $t_s = -4^{\circ}\text{C}$;

Расчётные параметры воздуха $t_{вр} = 30^{\circ}\text{C}$, $\varphi = 70\%$.

Примечание: тепловая изоляция рассчитывается по программе *K-Flex* [36] с учетом условия невыпадения конденсата.

Дополнительные исходные данные см. в таблице А3.

Схема магистрального трубопровода приведена на рисунке А4.

Затратами на вспомогательных участках (от потребителей №2, №3, №4 до магистрального трубопровода) пренебрегаем.

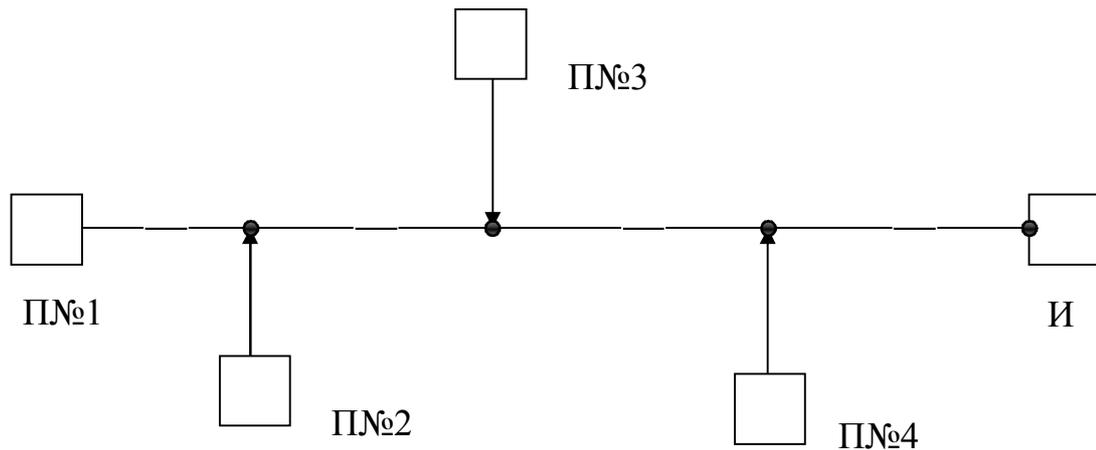


Рисунок А4 – Схема магистрального трубопровода.

И – испаритель; П №1 – потребитель холода №1.

Петров Евгений Тимофеевич
Круглов Алексей Александрович

Компьютерное проектирование низкотемпературных систем

Учебно-методическое пособие

В авторской редакции

Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО

Зав. РИО

Н.Ф. Гусарова

Подписано к печати

Заказ №

Тираж

Отпечатано на ризографе

Редакционно-издательский отдел
Университета ИТМО
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49