МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

**«МОСКОВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**
**(МОСКОВСКИЙ ПОЛИТЕХ)**

УТВЕРЖДАЮ
Декан Факультета урбанистики и
городского хозяйства
_____ / Л.А. Марюшин/

# РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ
# «Теплоэнергетические системы промышленных предприятий»

Направление подготовки
**13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»**

Профиль подготовки
**Энергообеспечение предприятий**

Квалификация (степень) выпускника
**Бакалавр**

Форма обучения
**Заочная**

Москва
2022

## 1. Цели освоения дисциплины

К **основным целям** освоения дисциплины «Теплоэнергетические системы промышленных предприятий» относятся:

– дать представление о сути системного подхода к объектам энергетики, классификации и иерархии теплоэнергетических систем, о способах описания их структуры, моделирования стационарных и динамических режимов, о методах синтеза оптимальных теплоэнергетических систем в отрасли.

К **основным задачам** освоения дисциплины «Теплоэнергетические системы промышленных предприятий» относятся:

– предоставить базовые знания о перспективах развития систем теплоэнергоснабжения промышленных предприятий, обеспечивающих централизованное производство, преобразование, распределение и регулирование потоков энергоносителей.

## 2. Место дисциплины в структуре ООП бакалавриата

Дисциплина «Теплоэнергетические системы промышленных предприятий» относится к числу профессиональных учебных дисциплин по выбору основной образовательной программы бакалавриата. «Теплоэнергетические системы промышленных предприятий» взаимосвязана логически и содержательно-методически со следующими дисциплинами и практиками ООП:

- Техническая термодинамика;
- Котельные установки и парогенераторы;
- Топливо и теория горения;
- Теплоэнергетические системы промышленных предприятий;
- Источники и системы теплоснабжения предприятий и ЖКХ.

## 3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю), соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы

В результате освоения дисциплины (модуля) у обучающихся формируются следующие компетенции и должны быть достигнуты следующие результаты обучения как этап формирования соответствующих компетенций:

| Код компетенции | В результате освоения образовательной программы обучающийся должен обладать | Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине |
|---|---|---|
| ОПК-3 | способен демонстрировать применение основных способов получения, преобразования, транспорта и использования теплоты в теплотехнических установках и системах | **знать:**<br>• методики сбора и анализа исходных данных для проектирования энергообъектов и их элементов в соответствии с нормативной документацией<br>**уметь:**<br>• собирать и анализировать исходные данные для проектирования энергообъектов и их элементов в соответствии с нормативной документацией<br>**владеть:**<br>• методами сбора и анализа исходных данных для проектирования энергообъектов и их элементов в соответствии с нормативной документацией |

Общая трудоемкость дисциплины составляет **3** зачетные единицы, т.е. **108** академических часа (из них 90 часа – самостоятельная работа студентов). Разделы дисциплины «Теплоэнергетические системы промышленных предприятий» изучаются на третьем курсе.

**Девятый семестр:** лекции – 6 часов, семинарские занятия – 12 часов, форма контроля – экзамен.

Структура и содержание дисциплины «Теплоэнергетические системы промышленных предприятий» по срокам и видам работы отражены в приложении.

## Содержание разделов дисциплины

**Тема 1**. *Топливно-энергетический комплекс России.*

Основные энергосистемы и энергоресурсы, используемые в промышленности, проблемы их рационального использования.

**Тема 2**. *Теплоэнергетическая система предприятия*.

Теплоэнергетическая система предприятия как комплекс энергоустановок, технологических агрегатов, трубопроводов и систем для транспорта энергоносителей. Варианты структуры теплоэнергетических систем.

**Тема 3**. *Компоновка теплоэнергетических систем.*

Способы представления структуры замкнутых и разомкнутых теплоэнергетических систем. Алгоритмы структурного анализа систем.

**Тема 4**. *Системный анализ в теплоэнергетике.*

Классификация моделей теплоэнергетических систем и их реализация. Моделирование в условиях неполной информации об объекте.

**Тема 5.** *Стационарные режимы работы теплоэнергетических систем.*

Алгоритмы реализации стационарных систем. Расчет параметров стационарных тепловых систем.

**Тема 6.** *Характеристики и модели динамических режимов тепловых систем.*

Динамика элементов и параметров тепловых систем. Нестационарные режимы работы оборудования.

**Тема 7.** *Оптимизация теплоэнергетических систем.*

Классификация задач оптимизации. Методы оптимизации, одномерные и многомерные задачи. Проведение оптимизационных расчетов.

**Тема 8.** *Учет ограничений в задачах оптимизации*.

Алгоритмы учета ограничений. Оптимизация распределения нагрузки при параллельной работе теплогенерирующего оборудования.

**Тема 9.** *Оптимизация толщины тепловой изоляции трубопроводов.*

Зависимость оптимизации от способа прокладки сети и условий эксплуатации.

**Тема 10.** *Характеристики систем теплоснабжения предприятия.*

Основные элементы систем теплоснабжения, режимы работы, методы построения систем.

**Тема 11.** *Схемы технологического ГВС.*

Классификация схем, решения по компоновке. Оптимизация оборудования схем ГВС.

**Тема 12.** *ВЭР промышленных предприятий.*

Характеристики ВЭР, графики выхода, направления использования.

**Тема 13.** *Методы построения теплоиспользующих систем с максимальной рекуперацией теплоты.*

Использование термодинамических ограничений при построении теплоиспользующих систем.

**Тема 14.** *Построение теплоэнергетических систем на базе комбинированной выработки энергоносителей.*

Баланс разных видов энергии на предприятии. Учет переменности режимов работы энергетического оборудования, повышение эффективности его работы.

## 5. Образовательные технологии

Методика преподавания дисциплины «Теплоэнергетические системы промышленных предприятий» и реализация компетентностного подхода в изложении и восприятии материала предусматривает использование следующих активных и интерактивных форм проведения групповых,

индивидуальных, аудиторных занятий в сочетании с внеаудиторной работой с целью формирования и развития профессиональных навыков обучающихся:

- чтение лекций;
- решение задач, связанных с тематикой дисциплины;
- обсуждение тем в виде дискуссии;
- самостоятельная работа студентов
- организация и проведение текущего контроля знаний студентов в форме устного опроса и тестирования.

Удельный вес занятий, проводимых в интерактивных формах, определен главной целью образовательной программы, особенностью контингента обучающихся и содержанием дисциплины «Теплоэнергетические системы промышленных предприятий» и в целом по дисциплине составляет 50% аудиторных занятий. Занятия лекционного типа составляют 50% от объема аудиторных занятий.

## 6. Оценочные средства для текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины и учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студентов

В процессе обучения используются следующие оценочные формы самостоятельной работы студентов, оценочные средства текущего контроля успеваемости и промежуточных аттестаций:

- устный опрос;
- тест.

Контрольные вопросы, задачи, тестовые вопросы для проведения текущего контроля, вопросы для проведения экзамена приведены в приложении.

### 6.1. Фонд оценочных средств для проведения промежуточной аттестации обучающихся по дисциплине (модулю)

#### 6.1.1. Перечень компетенций, формирующихся в процессе освоения образовательной программы

В результате освоения дисциплины (модуля) формируются следующие компетенции:

| Код компетенции | В результате освоения образовательной программы обучающийся должен обладать |
|---|---|
| ОПК-3 | способен демонстрировать применение основных способов получения, преобразования, транспорта и использования теплоты в теплотехнических установках и системах |

## 6.1.2. Описание показателей и критериев оценивания компетенций, формируемых по итогам освоения дисциплины (модуля), описание шкал оценивания

Показателем оценивания компетенций на различных этапах их формирования является достижение обучающимися планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю).

| **ОПК-3 -** способен демонстрировать применение основных способов получения, преобразования, транспорта и использования теплоты в теплотехнических установках и системах | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Показатель** | **Критерии оценивания** | | | |
| | **2** | **3** | **4** | **5** |
| **знать:** Основные принципы сбора и анализа исходных данных в соответствии с нормативной документацией | Обучающийся демонстрирует полное отсутствие или недостаточное соответствие следующих знаний: Основных принципов сбора и анализа исходных данных в соответствии с нормативной документацией | Обучающийся демонстрирует неполное соответствие следующих знаний: Основных принципов сбора и анализа исходных данных в соответствии с нормативной документацией Допускаются значительные ошибки, проявляется недостаточность знаний, по ряду показателей, обучающийся испытывает значительные затруднения при оперировании знаниями при их переносе на новые ситуации. | Обучающийся демонстрирует частичное соответствие следующих знаний: Основных принципов сбора и анализа исходных данных в соответствии с нормативной документацией, но допускаются незначительные ошибки, неточности, затруднения при аналитических операциях. | Обучающийся демонстрирует полное соответствие следующих знаний: Основных принципов сбора и анализа исходных данных в соответствии с нормативной документацией, свободно оперирует приобретенными знаниями. |
| **уметь:** Использовать нормативную документацию при сборе и анализе исходных данных для разработки энергосберегающих мероприятий | Обучающийся не умеет или в недостаточной степени умеет использовать нормативную документацию при сборе и анализе исходных данных для разработки энергосберегающих мероприятий. | Обучающийся демонстрирует неполное соответствие следующих умений: Использование нормативной документации при сборе и анализе исходных данных для разработки энергосберегающих мероприятий. | Обучающийся демонстрирует частичное соответствие следующих умений: Использование нормативной документации при сборе и анализе исходных данных для разработки энергосберегающих мероприятий. | Обучающийся демонстрирует полное соответствие следующих умений: Использование нормативной документации при сборе и анализе исходных данных для разработки энергосберегающ |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | | Допускаются значительные ошибки, проявляется недостаточность умений, по ряду показателей, обучающийся испытывает значительные затруднения при оперировании умениями при их переносе на новые ситуации. | Умения освоены, но допускаются незначительные ошибки, неточности, затруднения при аналитических операциях, переносе умений на новые, нестандартные ситуации. | их мероприятий. Свободно оперирует приобретенными умениями, применяет их в ситуациях повышенной сложности. |
| **владеть:**<br><br>Методами сбора и анализа исходных данных в соответствии с нормативной документацией | Обучающийся не владеет или в недостаточной степени владеет методами сбора и анализа исходных данных в соответствии с нормативной документацией. | Обучающийся владеет методами сбора и анализа исходных данных в соответствии с нормативной документацией в неполном объеме, допускаются значительные ошибки, проявляется недостаточность владения навыками по ряду показателей, Обучающийся испытывает значительные затруднения при применении навыков в новых ситуациях. | Обучающийся частично владеет методами сбора и анализа исходных данных в соответствии с нормативной документацией, навыки освоены, но допускаются незначительные ошибки, неточности, затруднения при аналитических операциях, переносе умений на новые, нестандартные ситуации. | Обучающийся в полном объеме владеет методами сбора и анализа исходных данных в соответствии с нормативной документацией, свободно применяет полученные навыки в ситуациях повышенной сложности. |

***Форма промежуточной аттестации: зачет.***

Промежуточная аттестация обучающихся в форме экзамена проводится по результатам выполнения всех видов учебной работы, предусмотренных учебным планом по данной дисциплине (модулю), при этом учитываются результаты текущего контроля успеваемости в течение семестра. Оценка степени достижения обучающимися планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю) проводится преподавателем, ведущим занятия по дисциплине (модулю) методом экспертной оценки. По итогам промежуточной аттестации по дисциплине (модулю) выставляется оценка «зачет» или «не зачет».

К промежуточной аттестации допускаются только студенты, выполнившие все виды учебной работы, предусмотренные рабочей программой по дисциплине «Топливо и теория горения» (указывается что именно – прошли промежуточный контроль, защитили рефераты, выступили с докладом и т.д.)

| Шкала оценивания | Описание |
|---|---|
| Зачет | Выполнены все виды учебной работы, предусмотренные учебным планом. Студент демонстрирует соответствие знаний, умений, навыков приведенным в таблицах показателей, оперирует приобретенными знаниями, умениями, навыками, применяет их в ситуациях повышенной сложности. При этом могут быть допущены незначительные ошибки, неточности, затруднения при аналитических операциях, переносе знаний и умений на новые, нестандартные ситуации. |
| Незачет | Не выполнен один или более видов учебной работы, предусмотренных учебным планом. Студент демонстрирует неполное соответствие знаний, умений, навыков приведенным в таблицах показателей, допускаются значительные ошибки, проявляется отсутствие знаний, умений, навыков по ряду показателей, студент испытывает значительные затруднения при оперировании знаниями и умениями при их переносе на новые ситуации. |

Фонды оценочных средств представлены в приложении 2 к рабочей программе.

## 7. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

Основная литература

**1.** Кудинов А.А., Зиганшина С.К. Теплоэнергетические системы и энергобалансы промышленных предприятий. М.: МАШИНОСТРОЕНИЕ, 2011 – 376 с. [электронный ресурс], https://e.lanbook.com/reader/book/2014/#1

Дополнительная литература

**2.** Шалай В.В. и др. Расчет тепловых процессов и установок в примерах и задачах: практикум. Омск: Издательство ОмГТУ, 2015 – 120 с. [электронный ресурс], (http://www.knigafund.ru/books/196517)

## 8. Материально-техническое обеспечение дисциплины

Проведение всех видов аудиторных занятий осуществляется с использованием материально-технической базы университета, соответствующей действующим санитарным и противопожарным правилам и нормам.

Необходимый для реализации ООП бакалавриата перечень материально-технического обеспечения включает в себя лаборатории, компьютерные классы, специально оборудованные кабинеты и аудитории.

Для использования электронных изданий каждый обучающийся обеспечивается во время самостоятельной подготовки рабочим местом в компьютерном классе с выходом в Интернет в соответствии с объемом изучаемой дисциплины.

## 9. Методические рекомендации для самостоятельной работы студентов

| Раздел дисциплины (тема) | Вид самостоятельной работы | Форма текущего контроля | Необходимая литература |
|---|---|---|---|
| Тема 2 | Самостоятельное изучение | Устный опрос | [1, 2] |
| Тема 3 | Самостоятельное изучение | Устный опрос | [1, 2] |
| Тема 4 | Самостоятельное изучение | Устный опрос | [1, 2] |
| Тема 5 | Самостоятельное изучение | Устный опрос | [1, 2] |
| Тема 6 | Самостоятельное изучение | Устный опрос | [1, 2] |
| Тема 7 | Самостоятельное изучение | Устный опрос | [1, 2] |
| Тема 8 | Самостоятельное изучение | Устный опрос | [1, 2] |
| Тема 9 | Самостоятельное изучение | Устный опрос | [1, 2] |
| Тема 10 | Самостоятельное изучение | Устный опрос | [1, 2] |
| Тема 11 | Самостоятельное изучение | Устный опрос | [1, 2] |
| Тема 12 | Самостоятельное изучение | Устный опрос | [1, 2]<br>[1, 2] |
| Тема 13 | Самостоятельное изучение | Устный опрос | [1, 2] |
| Тема 14 | Самостоятельное изучение | Устный опрос | [1, 2] |

## 10. Методические рекомендации для преподавателя

| Раздел дисциплины (тема) | Виды учебных занятий | Средства обучения | Методы обучения |
|---|---|---|---|
| Тема 1 | Лекции | Схемы систем и оборудования в виде слайдов и плакатов. Записи на доске. | Чтение лекций, метод беседы. |
| Тема 1 | Практическое занятие | Схемы систем и оборудования в виде слайдов и плакатов. Записи на доске. | Метод постановки и решения задач. Метод упражнений, ответов на вопросы. Метод мозгового штурма |

| | | | |
|---|---|---|---|
| Тема 2 | Лекции | Схемы систем и оборудования в виде слайдов и плакатов. Записи на доске. | Чтение лекций, метод беседы. |
| Тема 2 | Практическое занятие | Схемы систем и оборудования в виде слайдов и плакатов. Записи на доске. | Метод постановки и решения задач. Метод упражнений, ответов на вопросы. Метод мозгового штурма |
| Тема 3 | Лекции | Схемы систем и оборудования в виде слайдов и плакатов. Записи на доске. | Чтение лекций, метод беседы. |
| Тема 3 | Практическое занятие | Схемы систем и оборудования в виде слайдов и плакатов. Записи на доске. | Метод постановки и решения задач. Метод упражнений, ответов на вопросы. |
| Тема 4 | Лекции | Схемы систем и оборудования в виде слайдов и плакатов. Записи на доске. | Чтение лекций, метод беседы. |
| Тема 4 | Практическое занятие | Схемы систем и оборудования в виде слайдов и плакатов. Записи на доске. | Метод постановки и решения задач. Метод упражнений, ответов на вопросы. |
| Тема 5 | Лекции | Схемы систем и оборудования в виде слайдов и плакатов. Записи на доске. | Чтение лекций, метод беседы. |
| Тема 5 | Практическое занятие | Схемы систем и оборудования в виде слайдов и плакатов. Записи на доске. | Метод постановки и решения задач. Метод упражнений, ответов на вопросы. Метод мозгового штурма |
| Тема 6 | Лекции | Схемы систем и оборудования в виде слайдов и плакатов. Записи на доске. | Чтение лекций, метод беседы. |
| Тема 6 | Практическое занятие | Схемы систем и оборудования в виде слайдов и плакатов. Записи на доске. | Метод постановки и решения задач. Метод упражнений, ответов на вопросы. |
| Тема 7 | Лекции | Схемы систем и оборудования в виде слайдов и плакатов. Записи на доске. | Чтение лекций, метод беседы. |
| Тема 7 | Практическое занятие | Схемы систем и оборудования в виде слайдов и плакатов. Записи на доске. | Метод постановки и решения задач. Метод упражнений, ответов на вопросы. |
| Тема 8 | Лекции | Схемы систем и оборудования в виде | Чтение лекций, метод беседы. |

| | | | |
|---|---|---|---|
| | | слайдов и плакатов. Записи на доске. | |
| Тема 8 | Практическое занятие | Схемы систем и оборудования в виде слайдов и плакатов. Записи на доске. | Метод постановки и решения задач. Метод упражнений, ответов на вопросы. Метод мозгового штурма |
| Тема 9 | Лекции | Схемы систем и оборудования в виде слайдов и плакатов. Записи на доске. | Чтение лекций, метод беседы. |
| Тема 9 | Практическое занятие | Схемы систем и оборудования в виде слайдов и плакатов. Записи на доске. | Метод постановки и решения задач. Метод упражнений, ответов на вопросы. |
| Тема 10 | Лекции | Схемы систем и оборудования в виде слайдов и плакатов. Записи на доске. | Чтение лекций, метод беседы. |
| Тема 10 | Практическое занятие | Схемы систем и оборудования в виде слайдов и плакатов. Записи на доске. | Метод постановки и решения задач. Метод упражнений, ответов на вопросы. |
| Тема 11 | Лекции | Схемы систем и оборудования в виде слайдов и плакатов. Записи на доске. | Чтение лекций, метод беседы. |
| Тема 11 | Практическое занятие | Схемы систем и оборудования в виде слайдов и плакатов. Записи на доске. | Метод постановки и решения задач. Метод упражнений, ответов на вопросы. Метод мозгового штурма |
| Тема 12 | Лекции | Схемы систем и оборудования в виде слайдов и плакатов. Записи на доске. | Чтение лекций, метод беседы. |
| Тема 12 | Практическое занятие | Схемы систем и оборудования в виде слайдов и плакатов. Записи на доске. | Метод постановки и решения задач. Метод упражнений, ответов на вопросы. |
| Тема 13 | Лекции | Схемы систем и оборудования в виде слайдов и плакатов. Записи на доске. | Чтение лекций, метод беседы. |
| Тема 13 | Практическое занятие | Схемы систем и оборудования в виде слайдов и плакатов. Записи на доске. | Метод постановки и решения задач. Метод упражнений, ответов на вопросы. |
| Тема 14 | Лекции | Схемы систем и оборудования в виде слайдов и плакатов. Записи на доске. | Чтение лекций, метод беседы. |

| | | | |
|---|---|---|---|
| Тема 14 | Практическое занятие | Схемы систем и оборудования в виде слайдов и плакатов. Записи на доске. | Метод постановки и решения задач. Метод упражнений, ответов на вопросы. Метод мозгового штурма |

Программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВО с учетом рекомендаций ПрООП ВО по направлению подготовки 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»

Авторы

Доцент кафедры «Промышленная теплоэнергетика»
к.т.н., доцент О.Б. Сенникова

Программа обсуждена на заседании кафедры «Промышленная теплоэнергетика». Протокол от 26 мая 2022 г. № 11.

Согласовано:

Заведующий кафедрой «Промышленная теплоэнергетика»
к.т.н., доцент Л.А. Марюшин

Руководитель ООП Е.А. Чугаев

Приложение 1

**Структура и содержание дисциплины «Теплоэнергетические системы промышленных предприятий» по направлению подготовки 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника» (бакалавр)**

| | Раздел | Семестр | Виды учебной работы, включая самостоятельную работу студентов, и трудоемкость в часах | | | | | Виды самостоятельной работы студентов | | | | | Формы аттестации | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Л | П/С | Лаб | СРС | КСР | К.Р. | К.П. | УО | Тест | К/р | Э | З |
| Тема 1 | Топливно-энергетический комплекс России. | 9 | | | | 6 | | | | | | | | |
| | Семинар. | 9 | | 1 | | | | | | | | | | |
| Тема 2 | Теплоэнергетическая система предприятия. | 9 | 1 | | | 8 | | | | | | | | |
| | Семинар. | 9 | | 1 | | | | | | + | | | | |
| Тема 3 | Компоновка теплоэнергетических систем. | 9 | | | | 6 | | | | | | | | |
| | Семинар. | 9 | | 1 | | | | | | | | | | |
| Тема 4 | Системный анализ в теплоэнергетике. | 9 | 1 | | | 8 | | | | | | | | |
| | Семинар. | 9 | | 1 | | | | | | | | | | |
| Тема 5 | Стационарные режимы работы теплоэнергетических систем. | 9 | | | | 6 | | | | | | | | |
| | Семинар. | 9 | | 1 | | | | | | + | | | | |
| Тема 6 | Характеристики и модели динамических режимов тепловых систем. | 9 | 1 | | | 6 | | | | | | | | |
| | Семинар. | 9 | | 1 | | | | | | | | | | |

| | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Тема 7 | Оптимизация теплоэнергетических систем. | 9 | | | | 6 | | | | | | | | |
| | Семинар. | 9 | | 1 | | | | | | | | | | |
| Тема 8 | Учет ограничений в задачах оптимизации. | 9 | | | | 6 | | | | | | | | |
| | Семинар. | 9 | | 1 | | | | | | + | | | | |
| Тема 9 | Оптимизация толщины тепловой изоляции трубопроводов. | 9 | 1 | | | 8 | | | | | | | | |
| | Семинар. | 9 | | 1 | | | | | | | | | | |
| Тема 10 | Характеристики систем теплоснабжения предприятия. | 9 | 1 | | | 6 | | | | | | | | |
| | Семинар. | 9 | | | | | | | | | | | | |
| Тема 11 | Схемы технологического ГВС. | 9 | | | | 6 | | | | | | | | |
| | Семинар. | 9 | | 1 | | | | | | + | | | | |
| Тема 12 | ВЭР промышленных предприятий. | 9 | 1 | | | 6 | | | | | | | | |
| | Семинар. | 9 | | | | | | | | | | | | |
| Тема 13 | Методы построения теплоиспользующих систем с максимальной рекуперацией теплоты. | 9 | | | | 6 | | | | | | | | |
| | Семинар. | 9 | | 1 | | | | | | | | | | |
| Тема 14 | Построение теплоэнергетических систем на базе комбинированной выработки энергоносителей. | 9 | | | | 6 | | | | | | | | |
| | Семинар. | 9 | | 1 | | | | | | + | | | | |
| | Форма аттестации | | | | | | | | | | | | Э | |
| | Всего часов по дисциплине в девятом семестре | 108 | 6 | 12 | | 90 | | | | | | | | |

Приложение 2

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

**«МОСКОВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**(МОСКОВСКИЙ ПОЛИТЕХ)**

Направление подготовки: 13.03.01 Теплоэнергетика и теплотехника

ОП (профиль): «Энергообеспечение предприятий»

Форма обучения: заочная

Кафедра: «Промышленная теплоэнергетика»

# ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ
# ПО ДИСЦИПЛИНЕ
# «Теплоэнергетические системы промышленных предприятий»

1. Паспорт фонда оценочных средств
2. Оценочные средства
3. Список экзаменационных вопросов  по дисциплине
4. Задачи для практических занятий

Москва

2022

## 1. Паспорт фонда оценочных средств

| **Теплоэнергетические системы промышленных предприятий** | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| ФГОС ВО **13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»** | | | | | |
| В процессе освоения данной дисциплины студент формирует и демонстрирует следующие **профессиональные компетенции**: | | | | | |
| **КОМПЕТЕНЦИИ** | | **Перечень компонентов** | **Технология формирования компетенций** | **Форма оценочного средства** | **Степени уровней освоения компетенций** |
| **ИНДЕКС** | **ФОРМУЛИРОВКА** | | | | |
| ОПК-3 | способен демонстрировать применение основных способов получения, преобразования, транспорта и использования теплоты в теплотехнических установках и системах | Знать: нормативно-техническую документацию, регламентирующую этапы, процесс и требования к проектированию; способы подбора необходимой нормативно-технической документации; необходимые исходные данные для проектирования энергообъектов<br>Уметь: работать с нормативно-технической документацией; подбирать необходимую нормативную документацию, соответствующую целям и задачам проектирования; подбирать необходимую нормативную документацию в области проектирования энергообъектов<br>Владеть: навыками подбора нормативной документации; навыками использования нормативной документации, соответствующей целям и задачам проектирования; навыками практического использования нормативно-технической документации в области проектирования энергообъектов | Лекции<br>Практические занятия<br>Собеседование<br>СРС<br>Решение задач | Вопросы к экзамену<br>Задачи<br>Ответы студента на дополнительные вопросы<br>Выполненный тест | Базовый уровень: способен участвовать в сборе и анализе исходных данных для проектирования энергообъектов и их элементов в соответствии с нормативной документацией в стандартных производственных ситуациях<br>Повышенный уровень: способен обеспечивать сбор и анализ исходных данных для проектирования энергообъектов и их элементов в соответствии с нормативной документацией в нестандартных производственных ситуациях с их последующим анализом |

## 2. Оценочные средства

| № ОС | Наименование оценочного средства | Краткая характеристика оценочного средства | Представление оценочного средства в |
|---|---|---|---|
| 1 | Кейс-задача (К-З) | Проблемное задание, в котором обучающемуся предлагают осмыслить реальную профессионально-ориентированную ситуацию, необходимую для решения данной проблемы. | Задания для решения кейс-задачи |
| 2 | Коллоквиум (К) | Средство контроля усвоения учебного материала темы, раздела или разделов дисциплины, организованное как учебное занятие в виде собеседования педагогического работника с обучающимися. | Вопросы по темам/разделам дисциплины |
| 3 | Разноуровневые задачи и задания (РЗЗ) | Различают задачи и задания:<br>а) репродуктивного уровня, позволяющие оценивать и диагностировать знание фактического материала (базовые понятия, алгоритмы, факты) и умение правильно использовать специальные термины и понятия, узнавание объектов изучения в рамках определенного раздела дисциплины;<br>б) реконструктивного уровня, позволяющие оценивать и диагностировать умения синтезировать, анализировать, обобщать фактический и теоретический материал с формулированием конкретных выводов, установлением причинно- следственных связей;<br>в) творческого уровня, позволяющие оценивать и диагностировать умения, интегрировать знания различных областей, аргументировать собственную точку зрения. | Комплект разноуровневых задач и заданий |
| 5 | Доклад, сообщение (ДС) | Продукт самостоятельной работы студента, представляющий собой публичное выступление по представлению полученных результатов решения определенной учебно-практической, учебно-исследовательской или научной темы | Темы докладов, сообщений |
| 6 | Устный опрос собеседование, (УО) | Средство контроля, организованное как специальная беседа педагогического работника с обучающимся на темы, связанные с изучаемой дисциплиной, и рассчитанное на выяснение объема знаний обучающегося по определенному разделу, теме, проблеме и т.п. | Вопросы по темам/разделам дисциплины |

## 3. Список экзаменационных вопросов по дисциплине

1. Топливно-энергетический комплекс России. Основные энергосистемы и энергоресурсы, используемые в промышленности, проблемы их рационального использования.
2. Теплоэнергетическая система предприятия как комплекс энергоустановок, технологических агрегатов, трубопроводов и систем для транспорта энергоносителей.
3. Варианты структуры теплоэнергетических систем.
4. Компоновка теплоэнергетических систем.
5. Способы представления структуры замкнутых и разомкнутых теплоэнергетических систем.
6. Алгоритмы структурного анализа систем.
7. Системный анализ в теплоэнергетике. Классификация моделей теплоэнергетических систем и их реализация.
8. Моделирование в условиях неполной информации об объекте.
9. Стационарные режимы работы теплоэнергетических систем. Алгоритмы реализации стационарных систем. Расчет параметров стационарных тепловых систем.
10. Характеристики и модели динамических режимов тепловых систем. Динамика элементов и параметров тепловых систем.
11. Нестационарные режимы работы теплового оборудования.
12. Оптимизация теплоэнергетических систем. Классификация задач оптимизации. Методы оптимизации, одномерные и многомерные задачи. Проведение оптимизационных расчетов.
13. Учет ограничений в задачах оптимизации. Алгоритмы учета ограничений.
14. Оптимизация распределения нагрузки при параллельной работе теплогенерирующего оборудования.
15. Оптимизация толщины тепловой изоляции трубопроводов.
16. Зависимость методики оптимизации тепловой системы от способа прокладки сети и условий эксплуатации сети.
17. Характеристики систем теплоснабжения предприятия. Основные элементы систем теплоснабжения, режимы работы, методы построения систем.
18. Методы устранения дебалансов производственных теплоносителей.
19. Расчет конденсатных систем.
20. Схемы технологического ГВС.
21. Классификация схем ГВС, решения по компоновке.
22. Оптимизация оборудования схем ГВС.
23. ВЭР промышленных предприятий. Характеристики ВЭР, графики выхода, направления использования.
24. Методы построения теплоиспользующих систем с максимальной рекуперацией теплоты.
25. Использование термодинамических ограничений при построении

теплоиспользующих систем.

26. Построение теплоэнергетических систем на базе комбинированной выработки энергоносителей.

27. Баланс разных видов энергии на предприятии.

28. Учет переменности режимов работы энергетического оборудования, повышение эффективности его работы.

29. Какие виды энергоносителей используются для проведения основных технологических процессов в отделении пиролиза, а также на стадии выделения и разделения продуктов реакции в производстве этилена?

30. Охарактеризуйте приходную и расходную части энергетического баланса печи пиролиза. Как повлияла на них организация подогрева питательной воды?

31. Проведите анализ структуры теплового баланса производства синтетического этилового спирта методом прямой гидратации этилена. Перечислите статьи расходной части баланса, которые относятся к потерям тепловой энергии.

32. Характеристики, позволяющие оценить равномерность тепловых нагрузок в течение года.

33. Приведите примеры промышленных технологий, которые относятся к второй группе по доле расхода теплоты на собственные нужды

34. По суточному графику расхода пара на нефтехимическом предприятии определите его максимальное и минимальное значения и проведите их сравнение. Охарактеризуйте месячный график теплопотребления нефтехимического предприятия.

35. Чем объясняется неравномерность годовых графиков тепловых нагрузок промышленных предприятий?

36. Проведите сравнение графиков годовых нагрузок машиностроительных предприятий и химических комбинатов и сформулируйте выводы.

37. Всегда ли горючие отходы производства следует считать вторичными энергоресурсами? (примеры)

38. Охарактеризуйте структуру потребления теплоты в промышленности с учетом температурного уровня тепловосприятия.

39. Поясните принцип определения располагаемого количества теплоты ВЭР продуктов сгорания, направляемых в котлы-утилизаторы.

40. Какую эквивалентную экономию природного топлива дает экономия единицы теплоты на стадии потребления и почему?

41. Какая доля тепловой энергии поступает на промышленные предприятия от собственных источников? Охарактеризуйте все составляющие (ТЭЦ, котельные и т.п.).

42. По каким признакам классифицируются системы технологического пароснабжения?

43. Приведите характеристику структуры теплопотребления промышленного предприятия по основным статьям присоединенной тепловой нагрузки (технологическая, отопительно-вентиляционная, санитарно-техническая и пр.).

44. В каких случаях на промышленных предприятиях допускается сооружать системы открытого типа сбора и возврата конденсата? Возможна ли ситуация, когда организация систем сбора и возврата конденсата оказывается экономически нецелесообразной?

45. На примере принципиальных схем покажите, в чем различие систем сбора и возврата конденсата открытого и закрытого типов? Каковы пределы изменения режимных характеристик этих схем (температуры, давления, расхода и пр.)?

46. Объясните методику построения пароконденсатного баланса производственного участка. Какие мероприятия позволяют повысить эффективность работы пароконденсатных систем?

47. Каким образом осуществляется взаимосвязь между источником холода и потребителем в системах хладоснабжения с непосредственным испарением хладагента?

48. Перечислите достоинства и недостатки, которыми обладают централизованные системы оборотного водоснабжения?

49. Объясните принцип работы водоохладителя эжекционного типа?

50. Какие методы позволяют повысить эффективность работы системы оборотного водоснабжения?

51. Какие условия следует учитывать при организации систем воздухоснабжения промышленного предприятия?

52. Объясните причины работы систем воздухснабжения с установкой поршневых и центробежных компрессоров и укажите их различия?

53. Какие методы осушки используются в системах централизованного воздухоснабжения. По каким критериям выбирается тот или иной метод?

## 4. Задачи для практических занятий

**Пример 1**

Определить параметры состояния рабочего вещества в характерных точках термодинамического цикла одноступенчатой парокомпрессионной холодильной установки, расположенной в г. Москва, работающей на аммиаке (R717), с целью охлаждения хладоносителя до температуры $t_{\text{р}}'' = 0°\text{C}$

**Решение**

Определяем значение абсолютной максимальной температуры воздуха $t_{\text{а.м}}$ , среднемесячную температуру наиболее теплого месяца $t_{\text{ср.м}}$, среднюю месячную относительную влажность воздуха наиболее теплого месяца $\varphi_{\text{н}}$ для г. Саранска ($t_{\text{а.м}} = 39°\text{C}$ $t_{\text{ср.м}} = 19{,}2\ °\text{C}$, $\varphi_{\text{н}} = 55\ \%$):

Расчетная температура наружного воздуха для г. Саранска определяется по формуле:

$$t_{\text{н.р}} = t_{\text{ср.м}} + 0{,}25 * t_{\text{а.м}}\ °\text{C}$$

$$t_{\text{н.р}} = 19{,}2 + 0{,}25 * 39 \sim 29\ °\text{C}.$$

Температура мокрого термометра по h - d -диаграмме Рамзина (см. рис. 1) составит $t'' = 22\ °\text{C}$.

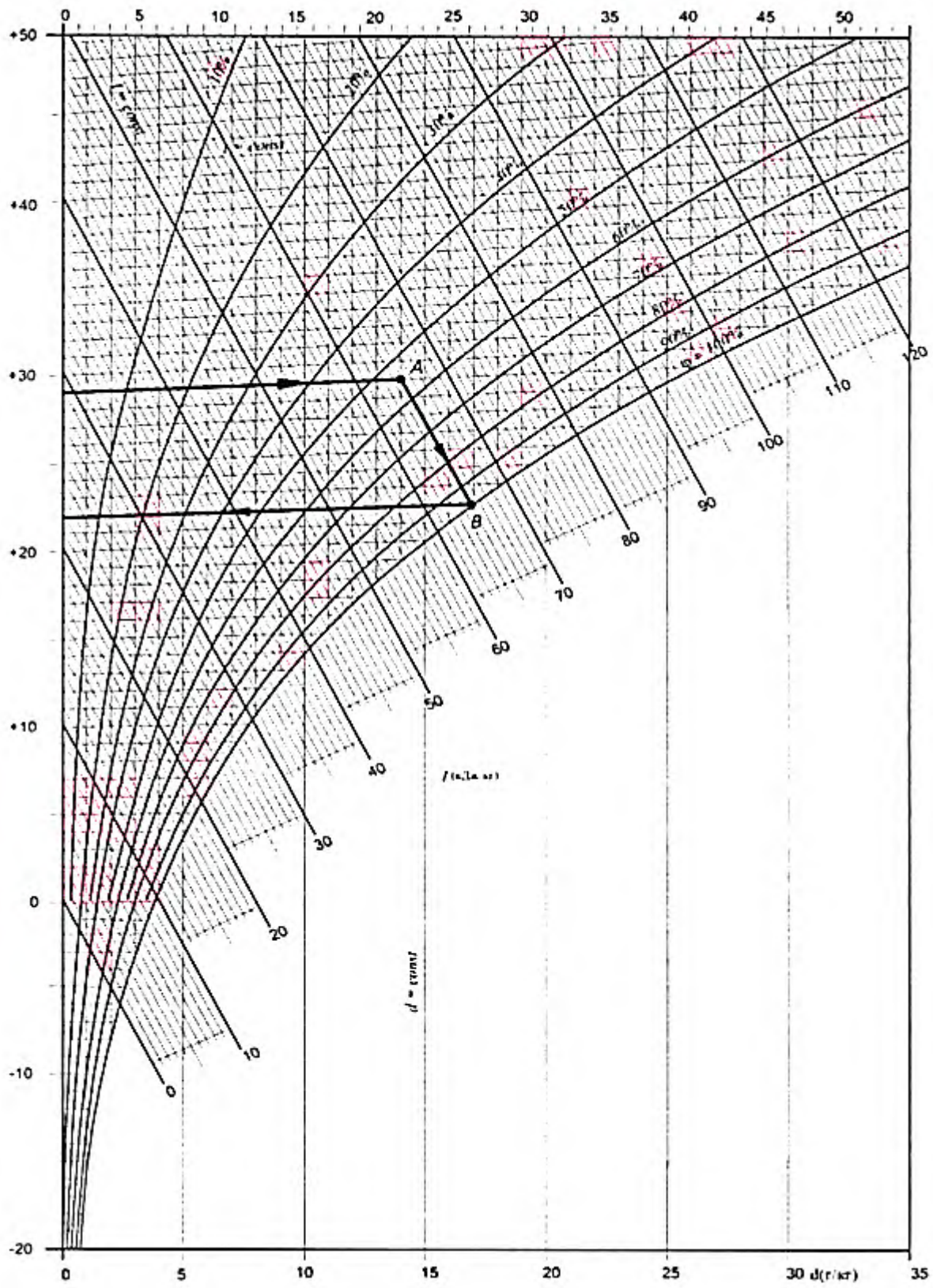



Рис. 1. Определение температуры мокрого термометра на диаграмме влажного воздуха

Температура воды на входе в конденсатор находится по формуле:

$$t'_{в} = t'' + \Delta t_{в} * (\frac{1}{\eta_{гр}} - 1), °C$$

$$t'_{в} = 22 + 3*(\frac{1}{0,4} - 1) = 26,5\ "C.$$

Температура воды на выходе из конденсатора определяется по формуле:

$$t''_{в} = t'_{в} + \Delta t_{в},\ °C$$

$$t''_{в} = 26,5 + 3 = 29,5\ °C.$$

Средняя температура воды в конденсаторе находится по формуле:

$$t_{в}^{ср} = \frac{t'_{в}+t''_{в}}{2},\ °C$$

$$t_{в}^{ср} = \frac{26,5 + 29,5}{2} = 28\ °C.$$

Температура конденсации определяется по формуле:

$$t_{к} = t_{в}^{ср} + \Delta t\ ,\ °C$$

$$t_{к} = 28 + 5 = 33\ °C.$$

Температура хладоносителя на входе в испаритель определяется согласно (6):

$$t'_{р} = 2 + t''_{р},°C$$

$$t'_{р} = 2 + 0 = 2\ °C.$$

Средняя температура хладоносителя в испарителе определяется согласно (7):

$$t_{р}^{ср} = \frac{t'_{р}+t''_{р}}{2},°C$$

$$t_{р}^{ср} = \frac{0+2}{2} = 1\ °C$$

Температура кипения хладагента определяется в соответствии с (8):

$$t_{0} = t_{р}^{ср} - \Delta t,\ °C$$

$$t_{0} = 1 - 5 = -4\ °C$$

Температура всасывания определяется согласно формуле (9):

$$t_{вс} = t_{0} + \Delta t_{вс},\ °C$$

$$t_{вс} = -4 + 8 = 4\ °C.$$

Температура переохлаждения перед регулирующим вентилем, исходя из выражения (10), составит:

$$t_{п} = t_{к} - \Delta t_{р.т},\ °C$$

$$t_{п} = 33 - 4 = 29\ °C.$$

По полученным параметрам строится термодинамический цикл (рис. 2), по которому определяются необходимые параметры и заносятся в таблицу 1.

Таблица 1

Параметры в точках термодинамического цикла

| Точка | Температура t,°C | Давление P, Па | Удельный объем va м*/кг | Энтальпия h, кДж/кг | Энтропия s, кДж/кг К |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | -4 | 370 000 | - | 1 460 | 5,7 |
| 1' | 4 | 370 000 | 0,35 | 1 480 | 5,75 |
| 2 | 94 | 1280 000 | - | 1 660 | 5,75 |
| 3' | 33 | 1 280 000 | - | 360 | 1,55 |
| 3 | 29 | 1 280 000 | - | 330 | 1,45 |
| 4 | -4 | 370 000 | - | 330 | 1,5 |

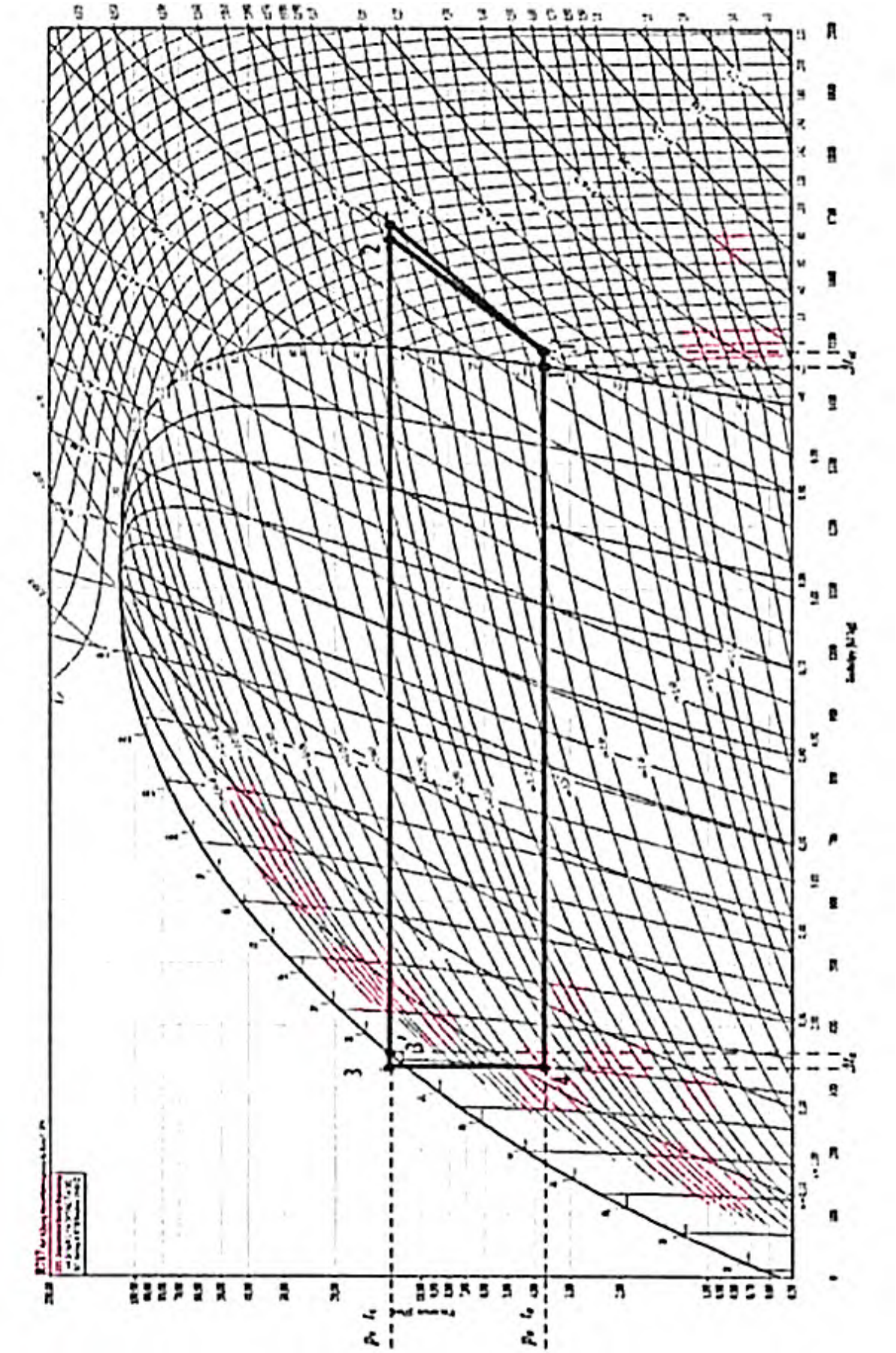


Рис. 2. Построение термодинамического цикла парокомпрессионной установки

**Пример 2**

Для полученных в примере 1 результатов произвести тепловой расчет и выбор компрессора для холодильной установки производительностью 100 кВт

**Решение**

Удельная холодопроизводительность цикла согласно (11)

$$q_0 = h_{1'} - h_4, \text{ кДж/кг.}$$

$$q_0 = 1480 - 330 = 1150 \text{ кДж/кг}$$

Индикаторный коэффициент подачи в соответствии с (12)

$$\lambda_i = \frac{P_0 + \Delta P_{вс}}{P_0} - c * \left[\frac{P_к + \Delta P_н}{P_0} - \frac{P_0 - \Delta P_{вс}}{P_0}\right],$$

$$\lambda_i = \frac{370 - 5}{370} - 0{,}05 * \left[\frac{1280 + 10}{370} - \frac{370 - 5}{370}\right] = 0{,}86$$

Коэффициент невидимых потерь для бескрейцкопфных компрессоров в соответствии с (13)

$$\lambda_{\omega'} = \frac{T_0}{T_к}$$

$$\lambda_{\omega'} = \frac{0+273.15}{33+273.15} = 0.89$$

Коэффициент подачи компрессора согласно (14)

$$\lambda = \lambda_{\omega'} * \lambda_i$$

$$\lambda = 0{,}89*0{,}86 = 0{,}77$$

Индикаторный КПД компрессора в соответствии с (15)

$$\eta_i = \lambda_{\omega'} - в t_0,$$

$$\eta_i = 0{,}89 + 0{,}001*0 = 0{,}89$$

Энтальпия рабочего агента на выходе из компрессора согласно (16)

$$h_{2'} = h_{1'} + \frac{h_2 - h_{1'}}{\eta_i} \text{ кДж/кг}$$

$$h_{2'} = 1480 + \frac{1660-1480}{0.89} = 1682 \text{ кДж/кг}$$

Удельная работа сжатия компрессора на 1 кг пара в соответствии с (17)

$$l = h_{2'} - h_{1'}, \text{ кДж/кг.}$$

$$l = 1682 - 1480 = 202 \text{ кДж/кг}$$

Удельная работа сжатия компрессора с учетом электромеханического КПД согласно (18)

$$l_{км} = \frac{l}{\eta_{эм}}, \text{ кДж/кг}$$

$$l_{км} = \frac{202}{0.9} = 224.4 \text{ кДж/кг}$$

Удельная тепловая нагрузка на конденсатор в соответствии с (19)

$$q_к = h_{2'} - h_3 \text{ кДж/кг}$$

$$q_к = 1682 - 330 = 1352 \text{ кДж/кг.}$$

Холодильный коэффициент цикла согласно (20)

$$\varepsilon = \frac{q_0}{l_{км}}$$

$$\varepsilon=\frac{1150}{224,4}=5,125$$

Масса циркулирующего хладагента согласно (21)

$$G_0=\frac{Q_0}{q_0}\ \text{, кг/с}$$

$$G_0=\frac{100}{1150}=0.087\ \text{кг/с}$$

Действительный объем пара, засасываемого в компрессор, в соответствии с (22)

$$V_0=G_0*\theta_1\ \text{, м}^3\text{/с}$$

$$V_0=0,087*0,35=0,03\ \text{м}^3\text{/с}$$

Объемная холодопроизводительность согласно (2.14)

$$q_\theta=\frac{q_0}{\theta_1}\text{, кДж/м}^3$$

$$q_\theta=\frac{1150}{0.35}\text{, кДж/м}^3.$$

Теоретическая объемная подача в соответствии с (23)

$$V_T=\frac{V_0}{\lambda}\ \text{м}^3\text{/с}$$

$$V_T=\frac{0,03}{0,77}=0,039\ м^3\text{/с}.$$

Далее осуществляется построение термодинамического цикла и производится тепловой расчет для стандартных условий, расчет осуществляется по описанной выше методике.

Удельная объемная холодопроизводительность в стандартных условиях определяется по (24)

$$q_\theta^{\text{ст}}=\frac{q_0^{\text{ст}}}{\theta_1^{\text{ст}}}\ \text{кДж/м}^3$$

$$q_\theta^{\text{ст}}=\frac{1160}{0,45}=2577,8\ \text{кДж/м}^3$$

Индикаторный коэффициент подачи для стандартных условий в соответствии с (25)

$$\lambda_{ст\,i}=\frac{240-5}{240}-0,05*\left[\frac{1200+10}{240}-\frac{240-5}{240}\right]=0,77$$

Коэффициент невидимых потерь для бескрейцкопфных компрессоров при стандартных условиях согласно (13)

$$\lambda_{\omega'}=\frac{-15+273,15}{30+273,15}=0,851$$

Коэффициент подачи компрессора в стандартных условиях в соответствии с (26)

$$\lambda_{ст}=\lambda_{ст\,\omega'}*\lambda_{ст\,i}$$

$$\lambda_{ст}=0,851*0,77=0,66$$

Стандартная холодопроизводительность согласно (27)

$$Q_{0\text{ст}}=\frac{Q_0*q_\theta^{\text{ст}}*\lambda_{ст}}{q_\theta*\lambda}\text{, кВт}$$

$$Q_{0\text{ст}}=\frac{100*2577,8*0,66}{3286*0,77}=67,3\ \text{, кВт}$$

Расчет для стандартных условий окончен.

Адиабатная мощность компрессора согласно (28)

$$N_a = G_0\ (h_2 - h_{1'})\ ,\ кВт$$

$$N_a = 0{,}087*(1660 - 1480) = 15{,}66\ кВт$$

Индикаторная мощность в соответствии с (29)

$$N_i = \frac{N_a}{\eta_i}\ ,\ кВт$$

$$N_i = \frac{15{,}66}{0{,}89} = 17{,}59\ ,\ кВт$$

Мощность трения согласно (30)

$$N_{тр} = V_т * P_{тр}\ ,\ кВт$$

$$N_{тр} = 0{,}039 * 0{,}050 = 0{,}00195\ ,\ кВт$$

Эффективная мощность в соответствии (31)

$$N_e = N_i + N_{тр}\ ,\ кВт$$

$$N_e = 17{,}59 + 0{,}0195 = 17{,}62\ кВт$$

Электрическая мощность двигателя (32)

$$N_{дв} = \frac{N_e}{\eta_{эм}}\ ,\ кВт$$

$$N_{дв} = \frac{17{,}62}{0{,}9} = 19{,}58\ кВт$$

По стандартной холодопроизводительности и электрической мощности двигателя выбирается компрессор П-80 с параметрами (табл. 2)

Таблица 2

Параметры компрессора

| Марка | Диаметр цилиндра, мм | Ход поршня, мм | Теоретическая объемная подача, $м^3/с$ | Частота вращения, с-1 | R717 | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | Холодопроизводительность, кВт | Потребляемая мощность, кВт |
| П-80 | 76,0 | 66,0 | 0,05780 | 24 | 91,8 | 25,5 |

**Пример 3**

Для полученных в примерах 1 и 2 результатов произвести расчет потерь эксергии в каждом элементе холодильной установки, составить эксергетический баланс и определить значение коэффициента полезного действия.

**Решение**

Коэффициент работоспособности холода при средней температуре охлаждаемого рассола $t_р^{ср}$ согласно (33)

$$(\tau_q)_н = 1 - \frac{T_{о.с}}{T_р^{ср}}$$

$$(\tau_q)_н = 1 - \frac{293}{274} = -\ 0{,}07$$

Удельная эксергетическая холодопроизводительность установки в соответствии с (34)

$$e_0 = q_0(\tau_q)_н, \text{ кДж/кг}$$

$$e_0 = 1150 * 0{,}07 = 80 \text{ кДж/кг.}$$

Эксергетический коэффициент полезного действия установки согласно (35)

$$\eta = \frac{Q_0(\tau_q)_н}{N_e}$$

$$\eta = \frac{100*0{,}07}{19{,}58} = 0{,}358 .$$

Для определения значения энтропии на термодинамической диаграмме в точке 2' наносим ее на диаграмму и определяем значение (рис. 3).

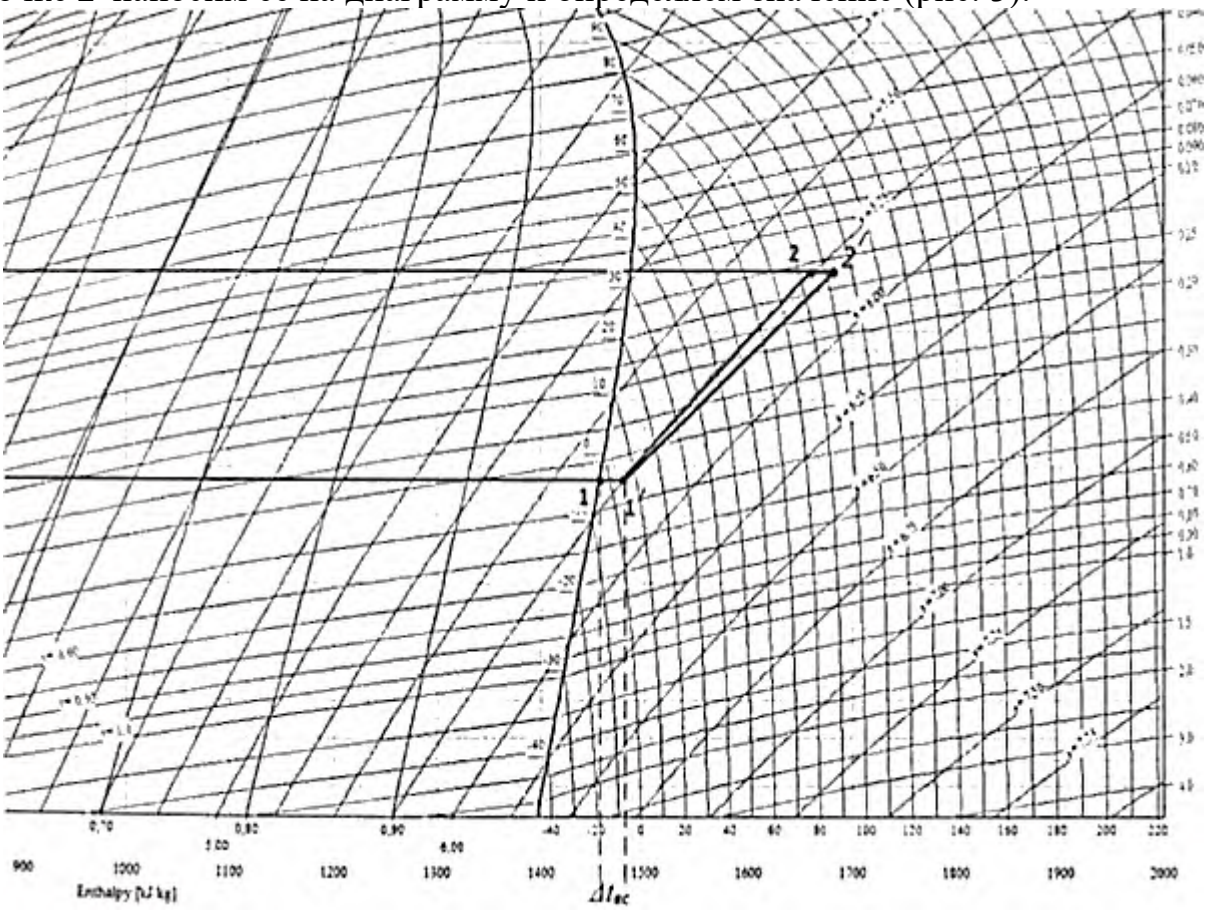



Рис. 3. Определение параметров в точке 2’

Значения удельных эксергий рабочего вещества в каждой точке определяются с учетом значений при стандартных условиях для аммиака

e = $h - h_{o.c} - T_{o.c} * (s - s_{o.c})$ ,

$T_{o.c}$= 293 К, $h_{o.c}$ = 1537 кДж/кг, $s_{o.c}$=6,58 кДж/кг*К

$e_{1'} = h_{1'} - h_{o.c} - T_{o.c} * (s_{1'} - s_{o.c})$ = 1480 - 1537 - 293*(5,75 - 6,58) = 186,19 кДж/кг.

Для остальных точек значения заносим в таблицу 3.

Таблица 3

**Значения эксергии в характерных точках**

| Точка | Температура t, °С | Давление Р, кПа | Энтальпия h, кДж/кг | Энтропия s, кДж/кг-К | Эксергия е, кДж/кг |
|---|---|---|---|---|---|
| 1' | 4 | 370 | 1 480 | 5,75 | 186,19 |
| 2' | 103 | 1 280 | 1 682 | 5,81 | 370,61 |
| 3 | 29 | 1 280 | 330 | 1,45 | 296,09 |
| 4 | -4 | 370 | 330 | 1,5 | 281,44 |

Удельное количество эксергии, подведенное к установке в компрессоре, в соответствии с (36)

$$e_{вх} = \frac{Т_{дв}}{G_0}, \text{ кДж/кг}$$

$$e_{вх} = \frac{19,58}{0,087} = 225 \text{ кДж/кг}$$

Электромеханические потери эксергии (37)

$$d_{эм} = e_{вх} * (1 - \eta_{эм}), \text{ кДж/кг.}$$

$$d_{эм} = 225 (1 - 0,9) = 22,5 \text{ кДж/кг.}$$

Удельная эксергия, подводимая к компрессору, определяется по формуле (38)

$$e_в = e_{вх} - d_{эм}, \text{ кДж/кг.}$$

$$e_в = 225 - 22,5 = 202,5 \text{ кДж/кг.}$$

Внутренние потери эксергии в компрессоре (39)

$$d_{км} = e_в - (e_{2'} - e_{1'}), \text{ кДж/кг.}$$

$$d_{км} = 202,5 - (370,61 - 186,19) = 18,08 \text{ кДж/кг.}$$

Эксергетический коэффициент полезного действия компрессора в соответствии с (40)

$$\eta_{км} = 1 - \frac{d_{км}}{e_в}$$

$$\eta_{км} = 1 - \frac{18,08}{202,5} = 0,91$$

Потери эксергии в конденсаторе определяются по формуле (41)

$$d_к = e_{2'} - e_3, \text{ кДж/кг.}$$

$$d_к = 370,61 - 296,09 = 74,52 \text{ кДж/кг.}$$

Коэффициент работоспособности тепловой энергии, переданной охлаждающей воде в конденсаторе, в соответствии с (42):

$$(\tau_q)_в = 1 - \frac{T_{о.с}}{T_в^{ср}}$$

$$(\tau_q)_в = 1 - \frac{293}{301} = - 0,027$$

Удельная эксергия, полученная охлаждающей водой, определяется по формуле (43):

$$\Delta e_{о.в} = q_к (\tau_q)_в, \text{ кДж/кг}$$

$$\Delta e_{о.в} = 1352 * 0,027 = 36,5 \text{ кДж/кг.}$$

Эксергетический коэффициент полезного действия конденсатора в соответствии с (44)

$$\eta_к = \frac{\Delta e_{о.в}}{d_к}$$

$$\eta_к = \frac{36,5}{74,52} = 0,49$$

Так как по условиям задачи теплота, полученная в конденсаторе охлаждающей водой, не используется, то КПД $\eta_к = 0$.

Потери эксергии в регулирующем вентиле (дросселе) определяется по формуле (45):

$$d_{рв} = e_3 - e_4 \text{ , кДж/кг.}$$

$$d_{рв} = 296,09 - 281,44 = 14,65 \text{ кДж/кг.}$$

Коэффициент полезного действия регулирующего вентиля (2.38)

$$\eta_{рв} = \frac{e_4}{e_3} \text{ кДж/кг}$$

$$\eta_{рв} = \frac{281,44}{296,09} = 0,95$$

Потери эксергии в испарителе (эксергия, отданная хладагентом) определяются в соответствии с (46):

$$d_0 = e_4 - e_{1'} \text{ , кДж/кг}$$

$$d_0 = 281,44 - 186,19 = 95,25 \text{ кДж/кг.}$$

Удельная эксергия, полученная рассолом, в соответствии с (47)

$$\Delta e_р = q_0(\tau_q)_н \text{ , кДж/кг.}$$

$$\Delta e_р = 1150 * 0,07 = 80 \text{ кДж/кг}$$

Эксергетический коэффициент полезного действия испарителя рассчитывается іо формуле (48)

$$\eta_0 = \frac{\Delta e_р}{d_0}$$

$$\eta_0 = \frac{\Delta e_р}{d_0} = \frac{80}{95,25} = 0,84$$

Эксергетический баланс парожидкостной компрессионной установки определяется по (49)

$$e_{вх} = d_{эм} + d_{км} + d_к + d_{рв} + d_0$$

$$225 = 22,5 + 18,08 + 74,52 + 14,65 + 95,25$$

Коэффициент полезного действия установки в соответствии с (2.44)

$$\eta = \frac{\Delta e_р}{e_{вх}}$$

$$\eta_0 = \frac{80}{225} = 0,36$$

**Пример 4**

Для полученных в примере 2 результатов произвести тепловой расчет конденсатора.

**Решение**

Нагрузка конденсатора в соответствии с (50)

$$Q_к = Q_0 + N_{дв} \text{ кВт}$$

$$Q_к = 100 + 19{,}58 = 119{,}58 \text{ кВт.}$$

Расход охлаждающей воды в конденсаторе согласно (51)

$$G_в = \frac{Q_к}{C_в \Delta t_в}$$

$$G_в = \frac{119{,}58}{4{,}19*3} = 9{,}51 \text{ кг/с}$$

Среднелогарифмическая разность температур определяется по (52)

$$\Delta t_{ср}^{лог} = \frac{\Delta t_б - \Delta t_м}{\ln \frac{\Delta t_б}{\Delta t_м}}$$

$$\Delta t_{ср}^{лог} = \frac{6.5 - 3.5}{\ln \frac{6.5}{3.5}} = 4.85$$

Задавшись скоростью воды для аммиачных конденсаторов v =2 м/с (по рис. 3.2), определяем коэффициент теплоотдачи $K'_{F_{вн}}$ =2,4 кВт/(м$^2$ °С)

В реальных условиях (53):

$$K_{F_{вн}} = \frac{1}{\frac{1}{K'_{F_{вн}}} + R_{ст}} \text{ кВт/(м}^2 \text{ °С)}$$

$$K_{F_{вн}} = \frac{1}{\frac{1}{2.4} + 0.2} = 1{,}61 \text{ кВт/(м}^2 \text{ °С)}$$

Внутренняя поверхность теплообмена конденсатора в соответствии с (54)

$$F_{вн} = \frac{Q_к}{K_{F_{вн}} \Delta t_{ср}^{лог}} \text{ м}^2$$

$$F_{вн} = \frac{119{,}58}{1{,}62*4{,}85} = 15{,}22 \text{ м}^2$$

Сделаем перерасчет на наружную поверхность по формуле

$$F_{нар} = 1{,}25 * F_{вн}$$

$$F_{нар} = 1{,}25 * 15{,}22 = 19{,}025 \text{ м}^2.$$

Выбираем аппарат с близкой площадью поверхности. Параметры выбранного кожухотрубного горизонтального фреонового конденсатора представлены в табл. 4.

Таблица 4

**Параметры кожухотрубного горизонтального фреонового конденсатора**

| Марка | Площадь действительной наружной поверхности, м2 | Максимальная производительность | Диаметр обечайки, мм | Число труб | Длина труб, м | Число ходов |
|---|---|---|---|---|---|---|
| КТР-25 | 30,0 | 104,7 | 404 | 135 | 1,5 | 4 |

***Теоретический расчет коэффициента теплопередачи***

Среднее количество труб по вертикали согласно (55)

$$n_{ср} = 0{,}92 n_{общ}^{0{,}5} \left(\frac{S_г}{S_в}\right)^{0{,}5} \text{ шт}$$

$$n_{ср} = 0{,}92 * 135^{0{,}5} * 1^{0{,}5} = 10{,}7 \sim 11 \text{ шт}$$

Коэффициент теплоотдачи одной трубы по табл. П 3.3, (прил. 3) В = 7 743,5 при t= 33 °С. Отсюда по (56)

$$\alpha_{конд} = 0{,}728B(\Delta td_н)^{-0{,}25}$$

$$\alpha_{конд} = 0{,}728 * 7743.5 * (5 * 0.0472)^{-0{,}25} = 8088 \text{ Вт/(м}^2 \text{ °С)}$$

Коэффициент теплоотдачи при конденсации пара на пучке труб (57)

$$\alpha_N = \alpha_{конд} * n_{ср}^{-0{,}167}$$

$$\alpha_N = 8088 \quad * 11^{-0{,}167} = 5419{,}12 \text{ Вт/(м}^2 \text{ °С)}$$

Линейная скорость в соответствии с (58)

$$v = \frac{4G_в}{\rho \pi d^2 F_x} \text{, м/с}$$

$$v = \frac{4*9.51}{996.58*3.14*0.021^2*33.75} = 0.82 \text{ , м/с}$$

$$F_x = \frac{135}{4} = 33.75$$

Число Рейнольдса (59)

$$Re = \frac{vd}{\upsilon}$$

$$Re = \frac{0.82 * 0.021}{0.805 * 10^{-6}} = 21391.3$$

Число Нуссельта (60)

$$Nu = 0.021 \acute{z} e^{0.8} \check{Z} r^{0.43} (\frac{\check{Z} r_ж}{\check{Z} r_с})^{0.25} \varepsilon_e$$

$$Nu = 0.021 * (21391{,}3)^{0.8} * (5{,}42)^{0.43} * (\frac{5{,}27}{5{,}42})^{0.25} = 125{,}6$$

Коэффициент теплоотдачи от воды к стенке согласно (61)

$$\alpha_в = \frac{Nu\lambda}{d} \text{ Вт/(м}^2 \text{ °С)}$$

$$\alpha_в = \frac{125{,}6*0{,}618}{0{,}021} = 3696{,}23 \text{ Вт/(м}^2 \text{ °С)}$$

Рекомендованное значение коэффициента теплопередачи в соответствии с (62)

$$K_{F_{вн}} = \frac{1}{\frac{F_{вн}}{F_н}\frac{1}{\alpha_N E_н} + R_{ст} + \frac{1}{\alpha_в E_{вн}}} \text{ Вт/(м}^2 \text{ °С)}$$

$$K_{F_{вн}} = \frac{1}{\frac{15{,}22}{19{,}025}\frac{1}{5419{,}12*1} + 0{,}15 + \frac{1}{3696{,}23*1}} = 0{,}15 \text{ Вт/(м}^2 \text{ °С)}$$

Оптимальное значение удельного теплового потока $q_{иск}$ определяется графически.

По (63) строятся графики двух тепловых потоков со стороны воды и пара соответственно и (64) $q_{конд}$ и $q_в$ (рис. 3.3):

$$q_{конд} = \alpha_N \Delta e^{0.75}$$

$$q_{конд} = 5{,}41912 * \Delta t^{0.75}$$

$$q_в = \alpha'_в \Delta t = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_в} + R_{ст}} \Delta t$$

$$q_{\text{в}} = \frac{1}{\frac{1}{3.69623} + 0.15}\Delta t = 2.375\Delta t$$

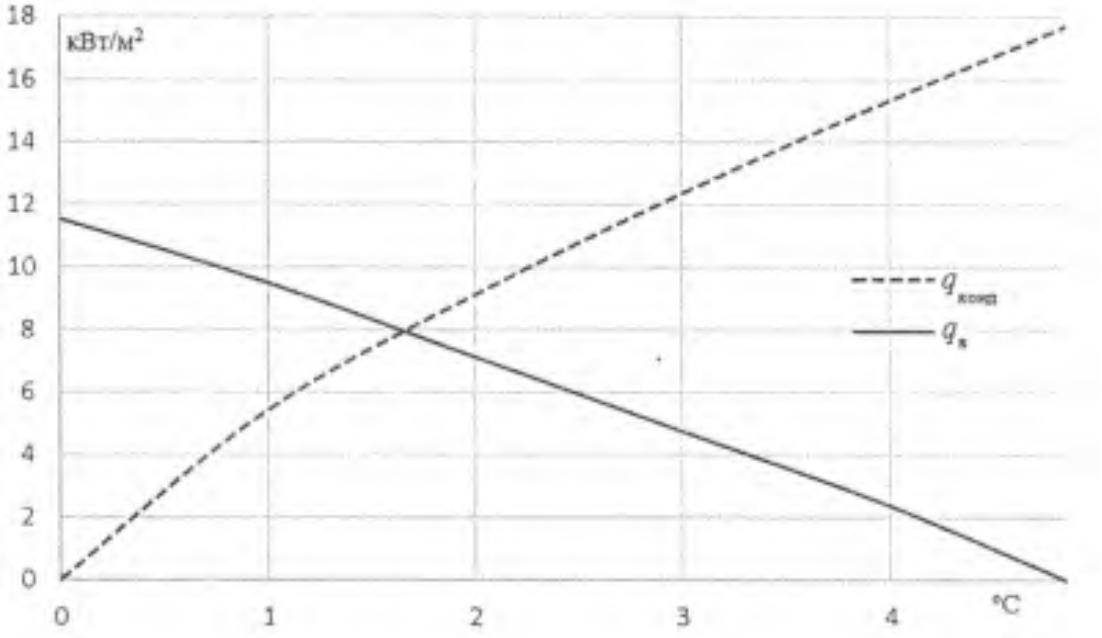



Рис. 4. Графическое определение искомого теплового потока $q_{\text{иск}}$

Окончательно поверхность аппарата согласно (65)

$$F = \frac{Q_{\text{к}}}{q_{\text{иск}}} \text{ м}^2$$

$$F = \frac{119{,}58}{8} = 14{,}95 \text{ м}^2$$

**Пример 5**

Для полученных в примере 2 результатов произвести тепловой расчет конденсатора.

**Решение**

Расход рассола в системе холодоснабжения через испаритель в соответствии с (66)

$$G_{\text{хл}} = \frac{Q_0}{C_p \Delta t_p}$$

$$G_{\text{хл}} = \frac{100}{4{,}19*2} = 11{,}93 \text{ кг/с.}$$

Температурный напор по (67)

$$\Delta t_{\text{ср}}^{\text{лог}} = \frac{\Delta t_{\text{б}} - \Delta t_{\text{м}}}{\ln\frac{\Delta t_{\text{б}}}{\Delta t_{\text{м}}}}$$

$$\Delta t_{\text{ср}}^{\text{лог}} = \frac{6-4}{\ln\frac{6}{4}} = 4{,}93 \text{ °C}$$

Тепловой поток со стороны рассола согласно (68)

$$q = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{хл}} + R_{ст}}$$

$$\alpha_{хл} = B\frac{\omega^{0.8}}{d_{вн}^{0.2}} \text{ кВт/(м}^2 \text{ °C)}$$

$$q = \frac{1}{\frac{1}{49{,}763} + 0{,}8} = 1{,}22\Delta t$$

$$\alpha_{хл} = 2298\frac{1^{0.8}}{0.021^{0.2}} = 49.763 \text{ кВт/(м}^2 \text{ °C)}$$

Тепловой поток со стороны хладагента определяется по (69):

$$q_{кип} = \alpha_{кип} * \Delta t$$

путем несложных преобразований:

$$\alpha_{кип} = 9q^{0.6}(P_0 10^{-5})^{0.15}$$

$$q_{кип} = 9q^{0.6}(P_0 10^{-5})^{0.15}\Delta t$$

$$\frac{q_{кип}}{q^{0.6}} = 9(P_0 10^{-5})^{0.15}\Delta t \quad (4.12)$$

$$q_{кип}^{0.4} = 9(P_0 10^{-5})^{0.15}\Delta t$$

$$q_{кип} = (9(P_0 10^{-5})^{0.15}\Delta t)^{2,5}$$

$$q_{кип} = (9(370000 * 10^{-5})^{0.15}\Delta t)^{2,5} = 3.72\Delta t^{2.5} \text{ кВт/м}^2.$$

Строятся графики полученных уравнений и определяется тепловой поток (рис. 5).

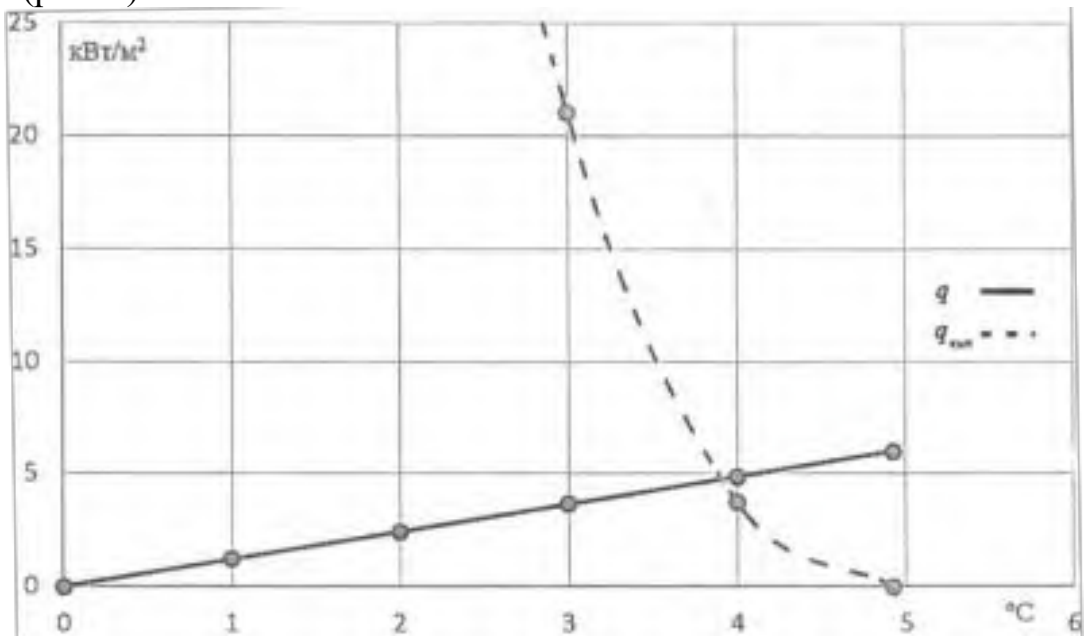



Рис. 5. Графическое определение искомого теплового потока $q_{вн}$

Для R717 наружная поверхность теплообмена испарителя (70)

$$F_{вн} = \frac{Q_0}{q_{вн}} \text{ м}^2$$

$$F_{вн} = \frac{100}{4.7} = 21.3 \text{ м}^2$$

в перерасчете на R12 в соответствии с (71)

$$q_{F_{OP}} = q_{вн}/\beta$$

$$q_{F_{OP}} = \frac{4.7}{3.63} = 1.3 \text{ кВт/м}^2$$

Находится поверхность испарения (72):

$$F_{\text{вн}} = \frac{Q_0}{q_{F_{\text{ор}}}}$$

$$F_{\text{вн}} = \frac{100}{1.3} = 76{,}92 \text{ м}^2$$

По табл. П 4.2 (прил. 4) выбирается испаритель с близкими параметрами и записываются его характеристики в табл. 5

Таблица 5

**Характеристики испарителя**

| Марка | Холодильный агент | Площадь передающей поверхности, $м^2$ | Диаметр кожух, мм | Длина кожуха, мм | Число труб, шт. | Число горизонтальных рядов труб | Диаметр условного прохода штуцера, мм | | | Число ходов, ед. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | по агенту | | по хладоносителю (вход и выход) | |
| | | | | | | | вход | выход | | |
| ИТР-105 | 12 | 100/33 | 600 | 3 700 | 237 | 16 | 50 | 100 | 1 250 | 4 |

**Пример 6**

Рассчитать регенеративный теплообменник для условий изменения энтальпии рабочего вещества на 8 кДж/кг. Температура жидкого хладагента на входе и на выходе равна 32,5 и 28,5 °С соответственно. Температура пара на входе и выходе из теплообменника 32 и 20 °С.

**Решение**

Количество тепловой энергии, переданное в регенеративном теплообменнике, согласно (73)

$$Q = G_0 * \Delta h, \text{ кВт.}$$

$$Q = 1{,}4*8 = 11{,}2 \text{кВт}$$

Температурный напор по (74)

$$\Delta t_{\text{ср}}^{\text{лог}} = \frac{(t_{\text{ж}}'' - t_{\text{п}}') - (t_{\text{ж}}' - t_{\text{п}}'')}{ln\frac{t_{\text{ж}}'' - t_{\text{п}}'}{t_{\text{ж}}' - t_{\text{п}}''}} * \varepsilon_0 \ \ ^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_{\text{ср}}^{\text{лог}} = \frac{(28.5+32) - (32.5+20)}{ln\frac{28.5+32}{32.5+20}} * 1 = 56.4 \ ^\circ\text{C}$$

Коэффициент теплоотдачи со стороны жидкости в соответствии с (75)

$$\alpha_{\text{ж}} = B\frac{\omega^{0.8}}{d_{\text{вн}}^{0.2}}$$

$$\alpha_{\text{ж}} = 1380\frac{(0.8)^{0.8}}{(0.0132)^{0.2}} = 2.74 \text{ кВт/(м}^2 \ ^\circ\text{C)}$$

Число Рейнольдса для пара

$$Re = \frac{\omega * d}{v} = \frac{0.4 * 0.02}{1.4 * 10^{-6}} = 5714$$

Критерий Прандтля для пара

$$Pr = \frac{c\mu}{\lambda} = \frac{3 * 0.011 * 10^{-3}}{0.006} = 0.0055$$

Число Нуссельта (76)

$$Nu = c * Re''' * Pr''$$

$$Nu = 0.27 * 5714^{0.8} * 0.0055^{0.4} = 34.12$$

Коэффициент теплоотдачи со стороны пара согласно (77)

$$\alpha_п = \frac{Nu*\lambda}{d_н}$$

$$\alpha_п = \frac{34.12*0.006}{0.02} = 10.24 \text{ кВт/(м}^2 \text{ °С)}$$

Коэффициент теплопередачи в соответствии с (78)

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_ж}*\frac{F_п}{F_ж}+\frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}}+\frac{1}{\alpha_п}}$$

$$K = \frac{1}{\frac{1}{2,74}*0,66+0,17+\frac{1}{10,24}} = 1,4 \text{ кВт/(м}^2 \text{ °С)}$$

Поверхность теплообмена находится по формуле (79):

$$F = \frac{Q}{K*\Delta t_{ср}^{лог}}$$

$$F = \frac{11,2}{1,4*56,4} = 0,14 \text{ м}^2$$

Выбираем регенеративный теплообменник и записываем его характеристики в табл. 6.

Таблица 6

**Характеристики теплообменника**

| Марка | Площадь поверхности, м$^2$ | Диаметр патрубка, мм | | Диаметр трубы, мм | Материал трубы | Характеристика поверхности теплообменника | Число змеевиков шт. | Масса тепло-обменника,кг |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | парового | жидкого | | | | | |
| ТФ-25 | 0,15 | 25 | 10 | 10 | медь | гладкая | 1 | 11 |