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

## «Техническая термодинамика»

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 «Техническая термодинамика» следует отнести:

– формирование знаний о современных законах термодинамики и молекулярно-кинетической теории газов, об основных теплотехнологических и теплофизических параметрах состояния и процесса;

– изучение способов повышения эффективности теплофизических и теплотехнических процессов и систем, выработка навыков у студентов самостоятельно формулировать и решать задачи оценки теплотехнических и теплофизических параметров энергетических систем;

– подготовка студентов к деятельности в соответствии с квалификационной характеристикой бакалавра по направлению, в том числе формирование умений по выявлению необходимых усовершенствований и разработке новых, более эффективных методов оценки теплотехнических и теплофизических параметров энергетических систем.

К **основным задачам** освоения дисциплины «Техническая термодинамика» следует отнести:

– выработать навыки у студентов самостоятельно формулировать задачи определения и оценки теплотехнических и теплофизических параметров энергетических систем;

– научить мыслить системно на примерах повышения энергетической эффективности объектов энергетики с учетом теплофизических и теплотехнических характеристик;

– научить анализировать существующие методы определения и оценки теплотехнических и теплофизических параметров энергетических систем, разрабатывать и внедрять необходимые изменения в их структуре с позиций повышения эффективности и энергосбережения;

– дать информацию о новых методах определения и оценки теплотехнических и теплофизических параметров энергетических систем в отечественной и зарубежной практике, развивать способности объективно оценивать преимущества и недостатки таких методов, как отечественных, так и зарубежных;

– научить анализировать результаты определения и оценки теплотехнических и теплофизических параметров энергетических систем, производить поиск оптимизационного решения с помощью всевозможных методов фундаментальной и прикладной науки.

## 2. Место дисциплины в структуре ООП бакалавриата

Дисциплина «Техническая термодинамика» относится к числу профессиональных учебных дисциплин базовой части основной образовательной программы бакалавриата.

«Техническая термодинамика» взаимосвязана логически и содержательно-методически со следующими дисциплинами и практиками ООП:

– Общие вопросы энергетики;
– Гидрогазодинамика;
– Физика;
– Тепломассообмен.

## 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-2 | способен применять соответствующий физико-математический аппарат, методы анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования при решении профессиональных задач | **знать:**<br>• Методы выявления естественнонаучной сущности проблем, возникающих в ходе профессиональной деятельности<br>**уметь:**<br>• Обеспечивать применение для решения естественнонаучных проблем основные законы естествознания, методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования<br>**владеть:**<br>• Методами математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования |
| 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 |

## 4. Структура и содержание дисциплины

Общая трудоемкость дисциплины составляет **5** зачетных единиц, т.е. **180** академических часа (из них **160 часов** – самостоятельная работа студентов).

Структура и содержание дисциплины «Техническая термодинамика» по срокам и видам работы отражены в Приложении 1.

**Содержание разделов дисциплины**

**Третий семестр**

**Тема 1. Введение**

Предмет, задачи и содержание дисциплины. Роль технической термодинамики в освоении спецдисциплин. Классификация направлений, изучаемых в термодинамике. Основные термодинамические параметры состояния. Термодинамическая система. Термодинамический процесс. Теплота и работа. Термодинамическое равновесие.

**Тема 2. Состояние идеального газа. Реальные газы**

Основные законы идеальных газов. Уравнение состояния идеального газа. Основные свойства газовых смесей. Газовая постоянная смеси. Средняя молярная масса смеси. Парциальные давления.Уравнение состояния Ван-дер-Ваальса. Уравнение М.П. Вукаловича и И.И. Новикова. Смеси реальных газов.

**Тема 3. Первый закон термодинамики**

Внутренняя энергия. Работа расширения. Теплота. Аналитическое выражение первого закона термодинамики. Энтальпия.

**Тема 4. Теплоемкость газов. Энтропия**

Основные определения. Удельная (массовая), объемная и мольная теплоемкости газов. Теплоемкость в изохорном и изобарном процессах. Молекулярно-кинетическая и квантовая теории теплоемкости. Истинная и средняя теплоемкости. Зависимость теплоемкости от температуры. Отношение удельных теплоемкостей $c_p$ и $c_\upsilon$. Показатель адиабаты. Определение $q_p$ и $q_\upsilon$ для идеальных газов. Теплоемкость смеси идеальных газов. Энтропия.

**Тема 5. Термодинамические процессы идеальных газов**

Основные определения. Изохорный процесс. Изобарный процесс. Изотермический процесс. Адиабатный процесс. Политропные процессы.

**Тема 6. Второй закон термодинамики**

Основные положения. Круговые термодинамические процессы (циклы). Термический КПД и холодильный коэффициент циклов. Прямой обратимый

цикл Карно. Обратный обратимый цикл Карно. Математическое выражение второго закона термодинамики. Изменение энтропии в обратимых и необратимых процессах.

**Тема 7. Водяной пар. Влажный воздух**

Основные понятия и определения. p, υ-диаграмма водяного пара. T, s-диаграмма водяного пара. i, s-диаграмма водяного пара. Параметры состояния влажного воздуха. Диаграмма состояния влажного атмосферного воздуха.

**Тема 8. Истечение газов и паров. Дросселирование газов и паров**

Первый закон термодинамики в применении к потоку движущегося газа. Работа проталкивания. Располагаемая работа. Адиабатный процесс истечения. Истечение из суживающегося сопла. Истечение идеального газа из комбинированного сопла Лаваля. Дросселирование газа. Изменение удельной энтропии и температуры при дросселировании. Дросселирование водяного пара.

**Тема 9. Теплосиловые паровые циклы**

Цикл Карно. Цикл Ренкина. Влияние основных параметров на КПД цикла Ренкина. Влияние начального давления пара. Влияние начальной температуры пара. Влияние конечного давления в конденсаторе. Цикл с вторичным перегревом пара. Регенеративный цикл паротурбинной установки. Теплофикационные циклы.

**Тема 10. Циклы тепловых двигателей с газообразным рабочим телом**

Циклы поршневых двигателей внутреннего сгорания (ДВС). Циклы ДВС с подводом теплоты при постоянном объеме. Цикл ДВС с подводом теплоты при постоянном давлении (цикл Дизеля). Цикл ДВС со смешанным подводом теплоты (цикл Тринклера). Сравнение циклов поршневых двигателей внутреннего сгорания. Цикл двигателя Стирлинга.

**Тема 11. Циклы газотурбинных установок**

Цикл ГТУ с подводом теплоты при постоянном давлении. Цикл ГТУ с подводом теплоты при постоянном объеме. Методы повышения термического КПД ГТУ. Цикл ГТУ с регенерацией теплоты. Цикл ГТУ с подводом теплоты при p = const и регенерацией теплоты. Цикл ГТУ с подводом теплоты при υ = const и регенерацией теплоты. Цикл с многоступенчатым сжатием воздуха и промежуточным охлаждением.

**Тема 12. Циклы холодильных установок**

Основные понятия о работе холодильных установок. Цикл воздушной холодильной установки. Цикл парокомпрессионной холодильной установки. Цикл пароэжекторной холодильной установки. Цикл абсорбционной холодильной установки. Тепловой насос.

## 5. Образовательные технологии

Методика преподавания дисциплины «Техническая термодинамика» 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:

– подготовка к выполнению практических работ в аудиториях вуза и на мощностях предприятий-партнеров;

– защита и индивидуальное обсуждение выполняемых этапов расчетного задания;

– обсуждение и защита рефератов по дисциплине;

– организация и проведение текущего контроля знаний студентов в форме бланкового тестирования.

Удельный вес занятий, проводимых в интерактивных формах, определен главной целью образовательной программы, особенностью контингента обучающихся и содержанием дисциплины «Техническая термодинамика» и в целом по дисциплине составляет 50% аудиторных занятий. Занятия практического типа составляют 33% 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:

– обсуждение вопросов по изученным темам;

– собеседование / устный опрос;

– решенные задачи;

– тестирование;

– выполненные индивидуальные домашние работы.

Оценочные средства текущего контроля успеваемости включают контрольные вопросы и задания в форме бланкового тестирования для контроля освоения обучающимися разделов дисциплины, защита индивидуальных домашних работ.

Образцы тестовых заданий, заданий расчетных работ, контрольных вопросов и заданий для проведения текущего контроля, приведены в приложении 2.

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

#### 6.1.1. Перечень компетенций с указанием этапов их формирования в процессе освоения образовательной программы. В результате освоения дисциплины (модуля) формируются следующие компетенции

| Код компетенции | В результате освоения образовательной программы обучающийся должен обладать |
|---|---|
| ОПК-2 | способен применять соответствующий физико-математический аппарат, методы анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования при решении профессиональных задач |
| ОПК-3 | способен демонстрировать применение основных способов получения, преобразования, транспорта и использования теплоты в теплотехнических установках и системах |

В процессе освоения образовательной программы данные компетенции, в том числе их отдельные компоненты, формируются поэтапно в ходе освоения обучающимися дисциплин (модулей), практик в соответствии с учебным планом и календарным графиком учебного процесса.

### 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-2 - способен применять соответствующий физико-математический аппарат, методы анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования при решении профессиональных задач** | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Показатель** | **Критерии оценивания** | | | |
| | **Оценка «неудовлетворительно» (не зачтено) или отсутствие сформированности компетенции** | **Оценка «удовлетворительно» (зачтено) или низкой уровень освоения компетенции** | **Оценка «хорошо» (зачтено) или повышенный уровень освоения компетенции** | **Оценка «отлично» (зачтено) или высокий уровень освоения компетенции** |
| **знать:** Методы выявления естественнонаучной сущности проблем, возникающих в ходе профессиональной деятельности | Обучающийся демонстрирует полное отсутствие или недостаточное соответствие следующих знаний: методы выявления естественнонаучной сущности проблем, возникающих в ходе | Обучающийся демонстрирует неполное соответствие следующих знаний: методы выявления естественнонаучной сущности проблем, возникающих в ходе профессиональной деятельности. Допускаются значительные ошибки, | Обучающийся демонстрирует частичное соответствие следующих знаний: методы выявления естественнонаучной сущности проблем, возникающих в ходе профессиональной | Обучающийся демонстрирует полное соответствие следующих знаний: методы выявления естественнонаучной сущности проблем, возникающих в ходе профессиональной |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | профессиональной деятельности | проявляется недостаточность знаний, по ряду показателей, обучающийся испытывает значительные затруднения при оперировании знаниями при их переносе на новые ситуации. | деятельности, но допускаются незначительные ошибки, неточности, затруднения при аналитических операциях. | деятельности, свободно оперирует приобретенным и знаниями. |
| **уметь:** Обеспечивать применение для решения естественнонаучных проблем основные законы естествознания, методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования | Обучающийся не умеет или в недостаточной степени умеет обеспечивать применение для решения естественнонаучных проблем основные законы естествознания, методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования | Обучающийся демонстрирует неполное соответствие следующих умений: обеспечивать применение для решения естественнонаучных проблем основные законы естествознания, методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования. Допускаются значительные ошибки, проявляется недостаточность умений, по ряду показателей, обучающийся испытывает значительные затруднения при оперировании умениями при их переносе на новые ситуации. | Обучающийся демонстрирует частичное соответствие следующих умений: обеспечивать применение для решения естественнонаучных проблем основные законы естествознания, методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования. Умения освоены, но допускаются незначительные ошибки, неточности, затруднения при аналитических операциях, переносе умений на новые, нестандартные ситуации. | Обучающийся демонстрирует полное соответствие следующих умений: обеспечивать применение для решения естественнонаучных проблем основные законы естествознания, методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования. Свободно оперирует приобретенным и умениями, применяет их в ситуациях повышенной сложности. |
| **владеть:** Методами математического анализа и моделирования, теоретического и | Обучающийся не владеет или в недостаточной степени владеет методами математического анализа и | Обучающийся владеет методами математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального | Обучающийся частично владеет методами математического анализа и моделирования, | Обучающийся в полном объеме владеет методами математического анализа и моделирования, |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| экспериментального исследования | моделирования, теоретического и экспериментального исследования | исследования в неполном объеме, допускаются значительные ошибки, проявляется недостаточность владения навыками по ряду показателей, Обучающийся испытывает значительные затруднения при применении навыков в новых ситуациях. | теоретического и экспериментального исследования, навыки освоены, но допускаются незначительные ошибки, неточности, затруднения при аналитических операциях, переносе умений на новые, нестандартные ситуации. | теоретического и экспериментального исследования, свободно применяет полученные навыки в ситуациях повышенной сложности. |
| **ОПК-3 - способен демонстрировать применение основных способов получения, преобразования, транспорта и использования теплоты в теплотехнических установках и системах** | | | | |
| **знать:** методики сбора и анализа исходных данных для проектирования энергообъектов и их элементов в соответствии с нормативной документацией | Обучающийся демонстрирует полное отсутствие или недостаточное соответствие следующих знаний: методики сбора и анализа исходных данных для проектирования энергообъектов и их элементов в соответствии с нормативной документацией | Обучающийся демонстрирует неполное соответствие следующих знаний: методики сбора и анализа исходных данных для проектирования энергообъектов и их элементов 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: методики сбора и анализа исходных данных для проектирования энергообъектов и их элементов в соответствии с нормативной документацией, но допускаются незначительные ошибки, неточности, затруднения при аналитических операциях. | Обучающийся демонстрирует полное соответствие следующих знаний: методики сбора и анализа исходных данных для проектирования энергообъектов и их элементов в соответствии с нормативной документацией, свободно оперирует приобретенным и знаниями. |
| **уметь:** собирать и анализировать исходные данные для | Обучающийся не умеет или в недостаточной степени умеет собирать и | Обучающийся демонстрирует неполное соответствие следующих умений: | Обучающийся демонстрирует частичное соответствие следующих | Обучающийся демонстрирует полное соответствие следующих |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| проектирования энергообъектов и их элементов в соответствии с нормативной документацией | анализировать исходные данные для проектирования энергообъектов и их элементов в соответствии с нормативной документацией | собирать и анализировать исходные данные для проектирования энергообъектов и их элементов в соответствии с нормативной документацией. Допускаются значительные ошибки, проявляется недостаточность умений, по ряду показателей, обучающийся испытывает значительные затруднения при оперировании умениями при их переносе на новые ситуации. | умений: собирать и анализировать исходные данные для проектирования энергообъектов и их элементов в соответствии с нормативной документацией. Умения освоены, но допускаются незначительные ошибки, неточности, затруднения при аналитических операциях, переносе умений на новые, нестандартные ситуации. | умений: собирать и анализировать исходные данные для проектирования энергообъектов и их элементов в соответствии с нормативной документацией. Свободно оперирует приобретенным и умениями, применяет их в ситуациях повышенной сложности. |
| **владеть:** методами сбора и анализа исходных данных для проектирования энергообъектов и их элементов в соответствии с нормативной документацией | Обучающийся не владеет или в недостаточной степени владеет методами сбора и анализа исходных данных для проектирования энергообъектов и их элементов в соответствии с нормативной документацией | Обучающийся владеет методами сбора и анализа исходных данных для проектирования энергообъектов и их элементов 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 для проектирования энергообъектов и их элементов 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 для проектирования энергообъектов и их элементов в соответствии с нормативной документацией, свободно применяет полученные навыки в ситуациях повышенной сложности. |

Шкалы оценивания результатов промежуточной аттестации и их

описание:

**Форма промежуточной аттестации: экзамен (3 семестр)**

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 «отлично», «хорошо», «удовлетворительно» или «неудовлетворительно».

К промежуточной аттестации допускаются только студенты, выполнившие все виды учебной работы, предусмотренные рабочей программой по дисциплине «Техническая термодинамика» (прошли промежуточный контроль, выполнили весь объем заданий на семинарских занятиях, выступили с докладом на семинарском занятии)

| Шкала оценивания | Описание |
|---|---|
| Отлично | 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. |
| Хорошо | Студент показывает достаточный уровень теоретических и практических знаний, свободно оперирует категориальным аппаратом. Умеет анализировать практические ситуации, но допускает некоторые погрешности. Ответ построен логично, материал излагается грамотно. |
| Удовлетворительно | Студент показывает знание основного лекционного и практического материала. В ответе не всегда присутствует логика изложения. Студент испытывает затруднения при приведении практических примеров. |
| Неудовлетворительно | 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 приложениях к рабочей программе.

## 7. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

**а) основная литература:**

1. Миронова, Г.А. Молекулярная физика и термодинамика в вопросах и задачах. [Электронный ресурс]: учеб. пособие / Г.А. Миронова, Н.Н. Брандт, А.М. Салецкий. – Электрон. дан. – СПб.: Лань, 2012. – 480 с.

2. Афанасьев, Ю.О. Техническая термодинамика и теплотехника : сборник задач. [Электронный ресурс]: учеб. пособие / Ю.О. Афанасьев, И.И. Дворовенко. – Электрон. дан. – Кемерово: КузГТУ имени Т.Ф. Горбачева, 2011. – 96 с.

3. Новиков, И.И. Термодинамика. [Электронный ресурс]: учеб. пособие – Электрон. дан. – СПб.: Лань, 2009. – 592 с.

4. Цветков, О.Б. Термодинамики и теплопередача: Метод. указания к контрольным работам для студентов. [Электронный ресурс]: учеб.-метод. пособие / О.Б. Цветков, Ю.А. Лаптев. – Электрон. дан. – СПб.: НИУ ИТМО, 2008. – 52 с.

5. Иванова, И.В. Сборник задач по технической термодинамике: учебное пособие для студентов очной формы обучения. [Электронный ресурс]: учеб. пособие – Электрон. дан. – СПб.: СПбГЛТУ, 2012. – 168 с.

**б) дополнительная литература:**

1. Сахин, В.В. Термодинамика энергетических систем: учебное пособие для вузов: Книга 2: Техническая термодинамика. [Электронный ресурс]: учеб. пособие – Электрон. дан. – СПб.: БГТУ "Военмех" им. Д.Ф. Устинова, 2014. – 226 с.

2. Сборник лабораторных работ по курсу «Термодинамика». [Электронный ресурс]: учеб. пособие – Электрон. дан. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. – 67 с.

3. Лахмаков В.С., Коротинский В.А. Основы теплотехники и гидравлики. – РИПО, 2015. - 220 с.

4. Павлова, И.Б. Методы термодинамического анализа эффективности теплоэнергетических установок: учеб. пособие по курсу «Термодинамика». [Электронный ресурс]: учеб. пособие – Электрон. дан. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. – 108 с.

5. Начала термодинамики теория, вопросы, задачи: метод. пособие. [Электронный ресурс]: учеб. пособие – Электрон. дан. – Уфа: БГПУ имени М. Акмуллы, 2006. – 40 с.

## 8. Материально-техническое обеспечение дисциплины

Специализированная учебная лаборатория кафедры «Промышленная теплоэнергетика» Ауд. АВ2406, оснащенная лабораторными установками:

- «Определение коэффициента температуропроводности стали методом регулярного режима»;
- «Определение коэффициента теплопередачи при вынужденном течении жидкости в трубе (труба в трубе)»;

- «Определение коэффициента теплопередачи методом регулярного режима»;

- «Определение коэффициента теплоотдачи при пузырьковом кипении жидкости на цилиндре»;

- «Определение коэффициента теплопроводности твердых тел методом цилиндрического слоя».

Мультимедийная аудитория кафедры «Промышленная теплоэнергетика» Ауд. АВ2415, оснащенная оргтехникой и мультимедиа средствами (проектор, ПК и др.), экспериментальная котельная на базе ОАО ВТИ (на основании Договора о сотрудничестве) с системой КИП и автоматики.

## 9. Методические рекомендации для самостоятельной работы студентов

Корнеев С.Д., Марюшин Л.А., Афанасьева Е.В. Методические указания по организации самостоятельной работы по дисциплине «Техническая термодинамика»: Круговые процессы. Направление подготовки: 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника», профиль «Теплоэнергетические установки, системы и комплексы».

## 10. Методические рекомендации для преподавателя

Преподавание дисциплины «Техническая термодинамика» имеет своей целью ознакомить студентов с достижениями в области прикладной физики и естественных наук, добиться уяснения ими основных методов расчета параметров теплоэнергетических систем, порядка их применения, привить им практические навыки использования этих знаний к конкретным производственным ситуациям.

Преподавание дисциплины осуществляется в соответствии с ФГОС ВО.

*Целью* методических рекомендаций является повышение эффективности теоретических и практических занятий вследствие более четкой их организации преподавателем, создания целевых установок по каждой теме, систематизации материала по курсу, взаимосвязи тем курса, полного материального и методического обеспечения образовательного процесса.

*Средства обеспечения освоения дисциплины*

При изучении дисциплины рекомендуется использовать следующие средства:

− рекомендуемую основную и дополнительную литературу;

− методические указания и пособия;

− контрольные задания для закрепления теоретического материала;

− электронные версии федеральных законов, учебников и методических указаний для выполнения практических работ и самостоятельной работы бакалавров.

*Методические рекомендации по организации изучения дисциплины*

Для максимального усвоения дисциплины рекомендуется изложение лекционного материала с элементами обсуждения.

В качестве методики проведения практических занятий можно предложить

1. Семинар – обсуждение существующих точек зрения на проблему и пути ее решения.

2. Тематические доклады, позволяющие вырабатывать навыки публичных выступлений.

Для максимального усвоения дисциплины рекомендуется проведение письменного опроса (тестирование) магистров по материалам лекций и практических работ. Подборка вопросов для тестирования осуществляется на основе изученного теоретического материала. Такой подход позволяет повысить мотивацию бакалавров при конспектировании лекционного материала.

Для освоения навыков поисковой и исследовательской деятельности бакалавр пишет контрольную работу или реферат по выбранной (свободной) теме.

*Лекции* проводятся в основном посредством метода устного изложения с элементами проблемного подхода и беседы.

*Семинарские занятия* могут иметь разные формы (работа с исследовательской литературой, анализ данных нормативной и справочной литературы, слушание докладов и др.), выбираемые преподавателем в зависимости от интересов бакалавров и конкретной темы.

*Самостоятельная работа* бакалавра включает в себя элементы реферирования и конспектирования научно-исследовательской литературы, подготовки и написания научных текстов, отработку навыков устных публичных выступлений.

Проверка качества усвоения знаний в течение семестра осуществляется в устной форме, путем обсуждения проблем, выводимых на семинарах и письменной, путем выполнения бакалаврами разных по форме и содержанию работ и заданий, связанных с практическим освоением содержания дисциплины. Бакалавры демонстрируют в ходе проверки умение анализировать значимость и выявлять специфику различных проблем и тем в рамках изучаемой дисциплины и ее компонентов, знание научной и учебно-методической литературы. Текущая проверка знаний и умений бакалавров также осуществляется через проведение ряда промежуточных тестирований. Итоговая аттестация по дисциплине предполагает устный зачет или экзамен, на которых проверяется усвоение материала, усвоение базовых понятий дисциплины.

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

Авторы

Доцент кафедры «Промышленная теплоэнергетика»
к.т.н., доцент Л.А. Марюшин

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

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

Руководитель ООП Е.А. Чугаев

Приложение 1

**Структура и содержание дисциплины «Техническая термодинамика» по направлению подготовки 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»**

| | 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. | Тест | Домашняя работа | К/р | Э | З |
| | Третий семестр | 3 | | | | | | | | | | | | |
| Тема 1 | Лекция | 3 | 0,5 | | | 6 | | | | | | | | |
| | Семинарское занятие | 3 | | 0,5 | | | | | | | | | | |
| Тема 2 | Лекция | 3 | 0,5 | | | 14 | | | | | | | | |
| | Семинарское занятие | 3 | | 1 | | | | | | | | | | |
| Тема 3 | Лекция | 3 | 0,5 | | | 14 | | | | | | | | |
| | Семинарское занятие | 3 | | 1 | | | | | | | | | | |
| Тема 4 | Лекция | 3 | 0,5 | | | 14 | | | | | | | | |
| | Семинарское занятие | 3 | | 1 | | | | | | | | | | |
| Тема 5 | Лекция | 3 | 1 | | | 14 | | | | | | | | |
| | Семинарское занятие | 3 | | 1 | | | | | | + | | | | |
| Тема 6 | Лекция | 3 | 0,5 | | | 14 | | | | | | | | |
| | Лабораторная работа | 3 | | | 1 | | | | | | | | | |
| Тема 7 | Лекция | 3 | 0,5 | | | 14 | | | | | | | | |
| | Семинарское занятие | 3 | | 2 | | | | | | | | | | |
| Тема 8 | Лекция | 3 | 1 | | | 14 | | | | | | | | |
| | Семинарское занятие | 3 | | 1 | | | | | | | | | | |
| Тема 9 | Лекция | 3 | 1 | | | 14 | | | | | | | | |
| | Семинарское занятие | 3 | | 1 | | | | | | + | | | | |
| Тема 10 | Лекция | 3 | 1 | | | 14 | | | | | | | | |
| | Семинарское занятие | 3 | | 1 | | | | | | + | | | | |

| | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Тема 11 | Лекция | 3 | 0,5 | | | 14 | | | | | | | | |
| | Лабораторная работа | 3 | | | 1 | | | | | + | | | | |
| Тема 12 | Лекция | 3 | 0,5 | | | 14 | | | | | | | | |
| | Семинарское занятие | 3 | | 1 | | | | | | + | | | | |
| | Форма аттестации | 3 | | | | | | | | | | | Э | |
| | Всего часов по дисциплине во третьем семестре | 180 | 8 | 10 | 2 | 160 | | | | | | | | |

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

## «Техническая термодинамика»

1. Паспорт фонда оценочных средств
2. Оценочные средства
3. Домашняя работа по дисциплине
4. Методические рекомендации и указания для выполнения ДР
5. Вопросы к зачету (второй семестр)
6. Экзаменационные вопросы (третий семестр)
7. Примеры задач для практических занятий
8. Примеры тестовых заданий

Москва
2022

# 1. Паспорт фонда оценочных средств

| **Техническая термодинамика** | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| ФГОС ВО **13.03.01 Теплотехника и теплоэнергетика** | | | | | |
| **КОМПЕТЕНЦИИ** | | **Перечень компонентов** | **Технология формирования** | **Форма оценочного средства** | **Степени уровней освоения компетенций** |
| **ИНДЕКС** | **ФОРМУЛИРОВКА** | | | | |
| ОПК-2 | способен применять соответствующий физико-математический аппарат, методы анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования при решении профессиональных задач | **знать:** методы выявления естественнонаучной сущности проблем, возникающих в ходе профессиональной деятельности<br>**уметь:** обеспечивать применение для решения естественнонаучных проблем основные законы естествознания, методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования<br>**владеть:** методами математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования | Лекция, семинарские занятия, лабораторные занятия, решение ситуационных задач, СРС | Зачет, экзамен, выполнение домашней работы по индивидуальному заданию | Базовый уровень: способен демонстрировать базовые знания в области естественнонаучных дисциплин, готовность выявлять естественнонаучную сущность проблем, возникающих в ходе профессиональной деятельности; применять для их разрешения основные законы естествознания, методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования в стандартных производственных ситуациях<br>Повышенный уровень: способен демонстрировать базовые знания в области естественнонаучных дисциплин, готовностью выявлять естественнонаучную сущность проблем, возникающих в ходе профессиональной деятельности; применять для их разрешения основные законы естествознания, методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования в нестандартных производственных ситуациях с их последующим анализом |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| ОПК-3 | способен демонстрировать применение основных способов получения, преобразования, транспорта и использования теплоты в теплотехнических установках и системах | **знать:** методы проведения работ по оценке технического состояния и остаточного ресурса оборудования в организации; методы проведения профилактических осмотров и текущего ремонта оборудования<br>**уметь:** обеспечивать проведение работ по оценке технического состояния и остаточного ресурса оборудования в организации; проводить профилактические осмотры и текущий ремонт оборудования<br>**владеть:** методами проведения работ по оценке технического состояния и остаточного ресурса оборудования в организации; Навыками проведения профилактических осмотров и текущего ремонта оборудования | Лекция, семинарские занятия, лабораторные занятия, решение ситуационных задач,<br>СРС | Зачет, экзамен, выполнение домашней работы по индивидуальному заданию | 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 участвовать в сборе и анализе 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 ФОС |
|---|---|---|---|
| 1 | Разноуровневые задачи (РЗ) | Различают задачи и задания:<br>а) репродуктивного уровня, позволяющие оценивать и диагностировать знание фактического материала (базовые понятия, алгоритмы, факты) и умение | Разноуровневые задачи |
| 2 | Домашняя работа (ДР) | Средство проверки умений применять полученные знания по заранее определенной методике для решения задач или заданий по модулю или дисциплине в целом. | Комплект заданий для выполнения домашней работы |
| 3 | 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 |
| 4 | Тест (Т) | Система стандартизированных заданий, позволяющая автоматизировать процедуру измерения уровня знаний и умений обучающегося. | Фонд тестовых заданий |

## 3. Домашняя работа по дисциплине

Домашняя работа направлена на формирование умений и навыков по расчету по расчету термодинамических процессов и циклов, на оценку их энергетической эффективности.

Результатом работы являются вычисления теплофизических параметров прямого термодинамического цикла с определением его КПД.

Для выполнения ДР студенты руководствуются методическими рекомендациями и указаниями для подготовки к выполнению практических заданий «Техническая термодинамика. Круговые процессы»

## 4. Методические рекомендации и указания для выполнения ДР

Целью настоящих методических указаний является ознакомление студентов с методами анализа и расчета круговых процессов и получение практических навыков подобных расчетов.

## 1. ВИДЫ КРУГОВЫХ ПРОЦЕССОВ

Круговым процессом (циклом) называют такой процесс, в результате совершения которого термодинамическая система, претерпев ряд последовательных изменений своего состояния, возвращается в исходное состояние. Значит, все параметры состояния системы в итоге принимают первоначальное значение. Поэтому, на диаграммах состояния круговой процесс изображается замкнутой кривой. Термодинамическую систему, над которой совершается круговой процесс, принято называть рабочим телом.

### *Прямой и обратный круговые процессы*

Пример изображения кругового процесса в $p-v$ и $T-s$ диаграммах состояния показан на рис. 1.1.

Если некоторая термодинамическая система, используемая в качестве рабочего тела, имела в начальный момент времени состояние, соответствующее точке 1 (рис. 1.1а), то, после проведения над ней ряда процессов 1-2-3-4-1, она может быть возвращена в свое исходное состояние 1. Причем, рассматривая $p-v$ диаграмму, можно заметить, что процессы 1-2-3 сопровождаются увеличением объема термодинамической системы.

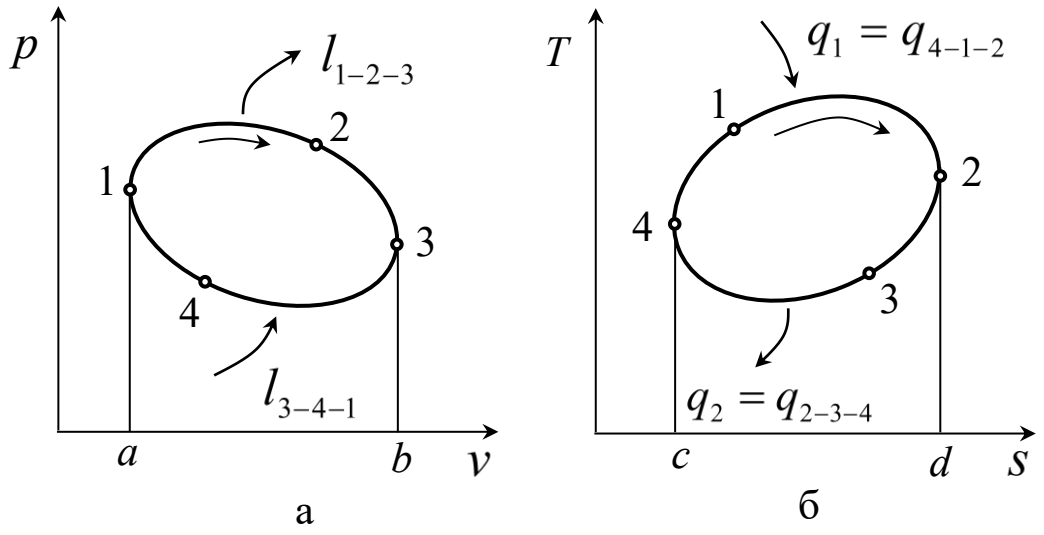



Рис. 1.1. Прямой круговой процесс в $p-v$ и $T-s$ диаграммах

Работа, совершаемая над окружающей средой в процессе расширения системы

$$l_{1-2-3} = \int_{1-2-3} pdv, \quad (1.1)$$

будет соответствовать площади под кривой процесса, т. е. площади а-1-2-3-б.

В свою очередь, процесс 3-4-1 сопровождается уменьшением объема термодинамической системы. Работа, совершаемая окружающей средой над системой

$$l_{3-4-1} = \int_{3-4-1} pdv, \quad (1.2)$$

соответствует площади а-1-4-3-б. Алгебраически, просуммировав указанные работы, можно найти полезную работу, полученную в результате совершения кругового процесса (цикла):

$$l_ц = \int_{1-2-3} pdv + \int_{3-4-1} pdv = \oint_{1-2-3-4-1} pdv, \quad (1.3)$$

которая в $p - v$ диаграмме соответствует площади фигуры 1-2-3-4-1.

За счет чего совершается работа цикла? Это становится ясно, если проинтегрировать уравнение первого закона термодинамики по замкнутому контуру 1-2-3-4-1:

$$\oint_{1-2-3-4-1} dq = \oint_{1-2-3-4-1} du + \oint_{1-2-3-4-1} pdv. \quad (1.4)$$

В связи с тем, что внутренняя энергия рабочего тела является параметром состояния, а, следовательно, потенциальной функцией

$$\oint_{1-2-3-4-1} du = 0. \quad (1.5)$$

В свою очередь,

$$\oint_{1-2-3-4-1} dq = \int_{4-1-2} Tds + \int_{2-3-4} Tds. \quad (1.6)$$

Смысл последнего уравнения удобно пояснить с помощью рис. 1.1б. Процессы 4-1-2, происходящие с увеличением энтропии рабочего тела, сопровождаются подводом к нему теплоты:

$$q_1 = \int_{4-1-2} Tds, \quad (1.7)$$

где $q_1$ – теплота, подведенная к рабочему телу при совершении цикла, соответствует площади с-4-1-2-d.

В свою очередь, процессы 2-3-4, происходящие с уменьшением энтропии, сопровождаются отводом теплоты от рабочего тела:

$$q_2 = -\int_{2-3-4} Tds, \quad (1.8)$$

где $q_2$ – теплота, отведенная от рабочего тела при совершении цикла, соответствует площади с-4-3-2-d. Ранее, при рассмотрении первого закона термодинамики, было отмечено, что положительной принято считать теплоту, подведенную к термодинамической системе. При анализе круговых процессов принято использовать понятие теплоты отведенной от рабочего тела. Это соответствует смене знака, т. е. появлению знака «минус» перед последним интегралом.

В результате полезная работа, получаемая в результате совершения цикла

$$l_ц = q_1 - q_2, \quad (1.9)$$

т.е. полезная работа, получаемая в результате совершения кругового процесса, соответствует разности подведенной и отведенной теплоты.

В рассмотренном круговом процессе работа расширения термодинамической системы превышала работу, затрачиваемую на ее сжатие.

Соответственно, теплота, подведенная к системе, превышала отведенную теплоту. Такой процесс называют прямым круговым процессом. В диаграммах состояния он изображается замкнутой кривой с направлением протекания процессов по часовой стрелке.

Прямой круговой процесс используется в тепловых двигателях-машинах для преобразования теплоты в работу. Сущность теплового двигателя можно отобразить схемой, представленной на рис. 1.2а. Здесь 2 – это рабочее тело, над которым совершается круговой процесс, например, газ в цилиндре двигателя. Для того чтобы подвести теплоту $q_1$ к рабочему телу, необходим горячий источник 1 – термодинамическая система, отдающая теплоту рабочему телу. Чтобы отвести теплоту $q_2$ от рабочего тела, необходим холодный источник 3 – термодинамическая система, получающая теплоту от рабочего тела.

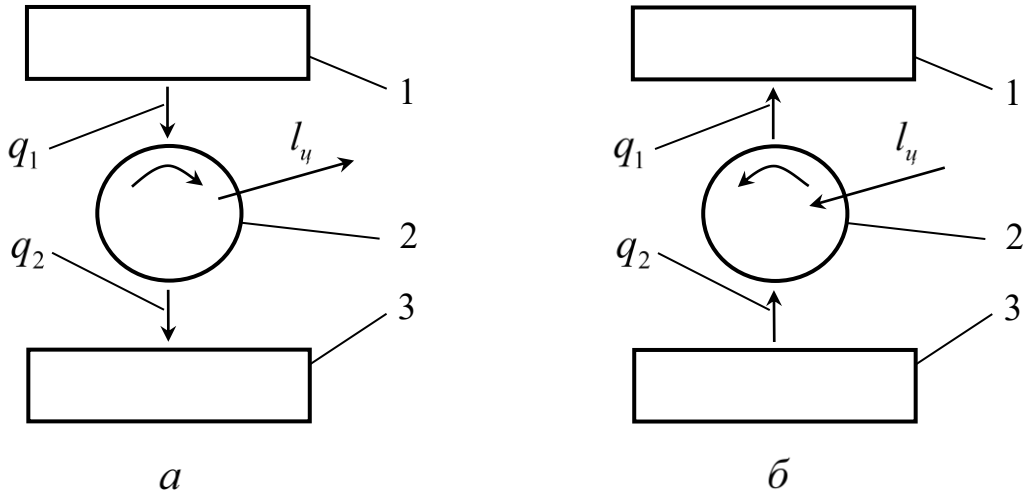



Рис. 1.2. Схемы организации прямого и обратного круговых процессов

Для оценки совершенства теплового двигателя используют понятие «термический коэффициент полезного действия теплового двигателя» – отношение работы, получаемой в результате совершения цикла к теплоте подведенной к рабочему телу.

$$\eta_t = \frac{l_ц}{q_1} = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = 1 - \frac{q_2}{q_1}. \qquad (1.10)$$

Термический коэффициент полезного действия теплового двигателя показывает, какая доля теплоты, отданной горячим источником, может быть преобразована в работу.

Кроме прямого кругового процесса, возможно осуществление и обратного кругового процесса, изображение которого в $p-v$ и $T-s$ диаграммах состояния представлено на рис 1.3. В обратном круговом процессе работа, затрачиваемая на сжатие рабочего тела $l_{1-2-3}$, соответствующая площади фигуры *a-3-2-1-b* (рис. 1.3а) больше работы $l_{3-4-1}$, получаемой при его расширении (площадь фигуры *a-3-4-1-b*). Значит, для осуществления обратного кругового процесса необходимо затратить работу. В обратном круговом процессе, как видно из рис. 1.3б, подвод теплоты $q_{2-3-4}$ к рабочему

телу происходит при сравнительно низкой температуре, а отвод теплоты $q_{4-1-2}$ осуществляется при высокой температуре. Значит, происходит то, что схематично показано на рис. 1.2б: теплота отводится от холодного источника 3 и, в результате совершения обратного кругового процесса передается горячему источнику 1, имеющему большую температуру. Таким образом осуществляется цикл холодильной установки, целью которого является отвод теплоты от холодного источника, например, от камеры холодильной установки.

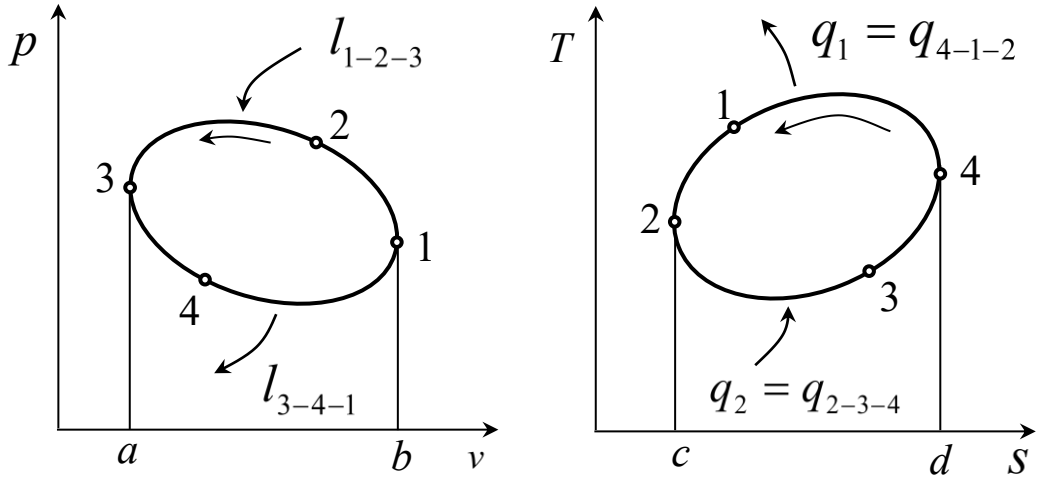



Рис. 1.3. Обратный круговой процесс в $p-v$ и $T-s$ диаграммах

### *Цикл Карно*

Как прямой, так и обратный круговые процессы, могут быть составлены из элементарных процессов, рассмотренных в [3]. Французский ученый Сади Карно впервые предложил и проанализировал цикл, состоящий из двух адиабатных и двух изотермических процессов. Далее мы определим коэффициент полезного действия (КПД) этого цикла и выясним, почему цикл Карно является основополагающим при сравнении эффективности циклов тепловых двигателей. Анализ цикла Карно в настоящее время удобнее всего проводить с помощью $T-s$ диаграммы (рис. 1.4).

Рабочее тело адиабатно сжимается от состояния 1 до состояния 2. Затем, при постоянной температуре $T_1$ к нему подводится теплота (процесс 2-3). Далее следует адиабатное расширение рабочего тела (процесс 3-4). И, наконец, производится изотермический отвод теплоты при постоянной температуре $T_2$ рабочего тела (процесс 4-1).

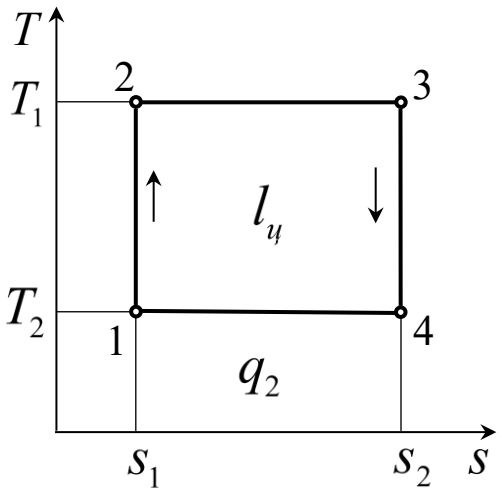



*Рис. 1.4. Цикл Карно в $T-s$ диаграмме.*

Работа цикла Карно соответствует площади прямоугольника 1-2-3-4:

$$l_ц = (T_1 - T_2)(s_2 - s_1)\ . \qquad (1.11)$$

В свою очередь, теплота, подведенная в цикле Карно, соответствует площади прямоугольника $s_1 - 2 - 3 - s_2$:

$$q_1 = T_1(s_2 - s_1). \qquad (1.12)$$

Подставляя уравнения (1.11), (1.12) в формулу (1.10) получаем выражение, определяющее термический коэффициент полезного действия цикла Карно

$$\eta_{tk} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}. \qquad (1.13)$$

Из уравнения (1.13), следует, что *коэффициент полезного действия цикла Карно тем выше, чем выше температура $T_1$ горячего источника и чем ниже температура $T_2$ холодного источника*.

Кроме того, сравнивая коэффициенты полезного действия циклов, можно показать, что *к. п. д. цикла Карно больше, чем к. п. д. любого другого цикла, осуществляемого в том же интервале температур.* Этот вывод можно обосновать следующим образом.

Рассмотрим некоторый произвольный цикл теплового двигателя, изображаемый в $T-s$ диаграмме замкнутой кривой (рис. 1.5). Рассмотрим в этой же диаграмме цикл Карно, осуществляемый в том же интервале температур (изотермы $T_1$ и $T_2$ цикла Карно касательные в точках максимальной и минимальной температур произвольного цикла). Как следует из уравнения (1.13), к.п.д. цикла Карно зависит только от температур подвода и отвода теплоты от рабочего тела. Поэтому положение двух адиабат не влияет на коэффициент полезного действия цикла Карно. Расположим адиабатные процессы таким образом, чтобы они касались кривой произвольного цикла в точках минимума и максимума энтропии.

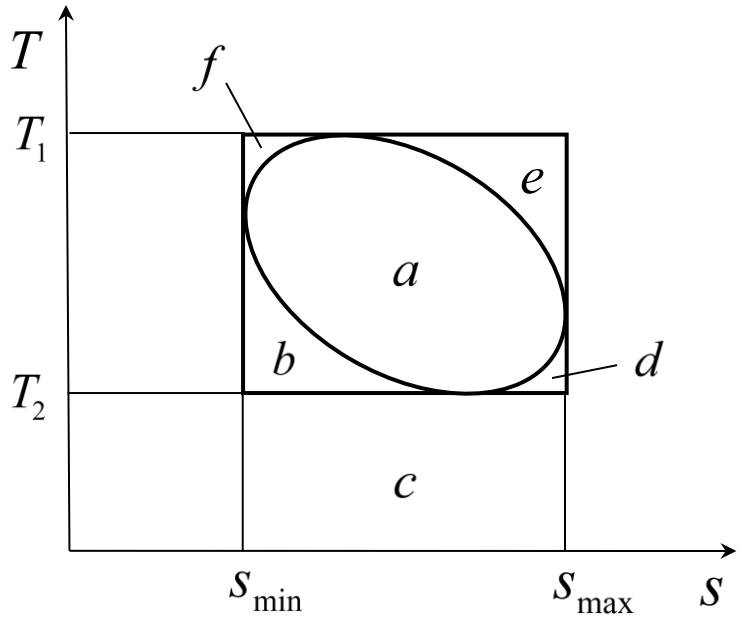



*Рис. 1.5. Сравнение произвольного цикла с циклом Карно.*

Из уравнения (1.10) и из знания того, что в $T-s$ диаграмме площадь под кривой процесса соответствует его теплоте [3], к.п.д. произвольного цикла выражается через следующие площади:

$$\eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{c+b+d}{a+c+b+d}. \quad \text{(а)}$$

Соответственно, для цикла Карно можно записать:

$$\eta_{tk} = 1 - \frac{c}{a+c+b+d+e+f}. \quad \text{(б)}$$

Поскольку

$$c + b + d > c,\ a + c + b + d < a + c + b + d + e + f,$$

С учетом этих неравенств, на основе уравнений (а), (б) получаем: $\eta_{tk} > \eta_t$, что и требовалось доказать.

Следовательно, цикл Карно является эталоном, определяющим максимум к.п.д. теплового двигателя в заданном интервале температур горячего и холодного источников, с которым можно сравнивать циклы реальных тепловых двигателей. Это позволяет судить о совершенстве того или иного цикла и выбирать лучший.

Круговой процесс может быть осуществлен с использованием различных элементарных термодинамических процессов. Если выполнить расчет параметров состояния рабочего тела, найти теплоту и работу в каждом из таких процессов, так как это делалось в [3] то можно перейти к определению термического коэффициента полезного действия исследуемого цикла, а также сравнить его с коэффициентом полезного действия цикла Карно, осуществляемого в том же интервале температур. Решению этой задачи посвящено домашнее задание, исходные данные и порядок выполнения которого приведены ниже.

## 2. РАСЧЕТ КРУГОВОГО ПРОЦЕССА

Для того, чтобы определить положение характерных точек кругового процесса, соответствующих параметрам состояния рабочего тела в точках пересечения элементарных процессов, составляющих цикл, рассчитать каждый из указанных элементарных процессов и определить к.п.д. цикла необходим соответствующий набор исходных данных, делающих решение однозначным.

### *2.1. Исходные данные к выполнению расчета прямого кругового процесса*

Необходимо выполнить расчет цикла Тринклера, который используется в ряде двигателей внутреннего сгорания. Изображение этого цикла в $p-v$ диаграмме представлено на рис. 2.1.

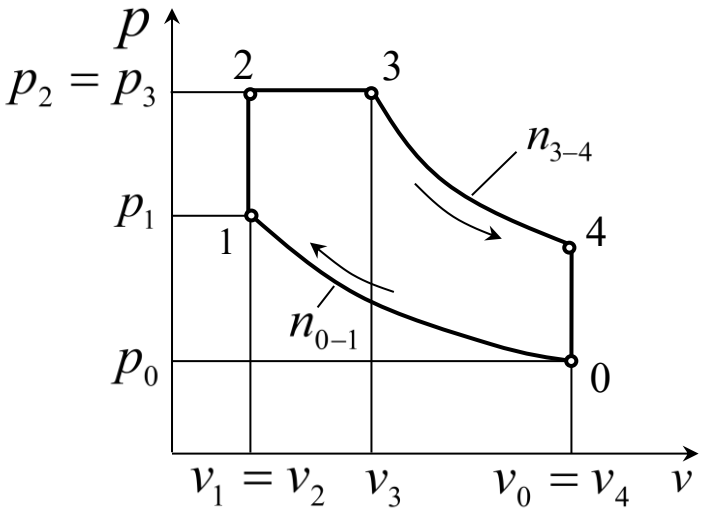



*Рис. 2.1. Цикл Тринклера.*

В рассматриваемом цикле от начального состояния 0 происходит политропное сжатие рабочего тела до состояния 1. Показатель политропы в этом процессе равен $n_{0-1}$. Затем следует подвод теплоты при постоянном объеме рабочего тела (процесс 1-2). Следующий процесс 2-3 соответствует подводу теплоты к рабочему телу при постоянстве его давления. Далее происходит процесс расширения в политропном процессе при показателе политропы равном $n_{3-4}$. И, наконец, рабочее тело возвращается в исходное состояние после изохорного процесса 4-0.

В расчете цикла приняты следующие условные обозначения:

1. Степень сжатия
$$\varepsilon = v_0/v_1,$$
2. Степень повышения давления
$$\lambda = p_2/p_1,$$
3. Степень предварительного расширения

$$\rho = v_3/v_2.$$

Рабочее тело, используемое в цикле – воздух. Его термодинамические свойства приняты следующими:

- Газовая постоянная $R$ = 287 Дж/(кг К);
- Удельная теплоемкость:
  - при постоянном объеме $c_v$ = 718 Дж/(кг К);
  - при постоянном давлении $c_p$= 1005 Дж/(кг К);
- Показатель адиабаты $k$ = 1,4.

Ниже приводится таблица 2.1, содержащая набор исходных данных, необходимых для выполнения домашнего задания.

Отчет о выполнении домашнего задания оформляется на листах формата А4. Оформление титульного листа (лист 1) дано в приложении.

На второй странице приводятся «*исходные данные»*, соответственно варианту индивидуального задания. Должны быть приведены сведения, указанные в параграфе 2.1. (включая рис. 2.1). Из таблицы 2.1. приводится только одна строка, в соответствии с вариантом задания.

На третьей странице дается заголовок: *«1. Расчет параметров состояния в характерных точках цикла»*. Под этим заголовком последовательно проводятся расчеты абсолютного давления, удельного объема, температуры, внутренней энергии, энтальпии и энтропии рабочего тела в точках 0, 1, 2, 3, 4. Результаты расчета сводятся в таблицу 1. Пример оформления этой таблицы дан ниже.

## 2.2. *Содержание и порядок выполнения домашнего задания*

Затем, на следующей странице отчета приводится заголовок: «*2. Расчет термодинамических процессов*». Под этим заголовком для каждого из процессов, составляющих цикл, рассчитываются изменение внутренней энергии $\Delta u$, изменение энтальпии $\Delta h$, теплоемкость процесса $c$, изменение энтропии $\Delta s$, теплота процесса $q$ и работа процесса $l$.

Таблица 2.1

***Варианты домашнего задания***

| № вар. | $p_0$, бар | $t_0$, $^0$C | ε | λ | ρ | $n_{0-1}$ | $n_{3-4}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0,8 | 0 | 6,0 | 1,60 | 1,35 | 1,3 | 1,4 |
| 2 | 0,85 | 5 | 6,3 | 1,72 | 1,15 | 1,35 | 1,52 |
| 3 | 0,9 | 10 | 6,7 | 1,30 | 1,20 | 1,3 | 1,45 |
| 4 | 0,95 | 15 | 7,0 | 1,37 | 1,18 | 1,4 | 1,47 |
| 5 | 1,0 | 20 | 7,3 | 1,05 | 1,30 | 1,32 | 1,4 |
| 6 | 1,05 | 25 | 7,7 | 1,55 | 1,09 | 1,34 | 1,57 |
| 7 | 1,1 | 30 | 8,0 | 1,25 | 1,15 | 1,4 | 1,45 |
| 8 | 0,8 | -15 | 8,4 | 1,20 | 1,35 | 1,3 | 1,4 |
| 9 | 0,85 | -10 | 8,8 | 1,37 | 1,25 | 1,4 | 1,52 |
| 10 | 0,9 | -5 | 9,0 | 1,14 | 1,17 | 1,35 | 1,4 |
| 11 | 0,95 | 0 | 9,3 | 1,24 | 1,18 | 1,40 | 1,50 |
| 12 | 1 | 5 | 9,6 | 1,30 | 1,21 | 1,32 | 1,40 |
| 13 | 1,05 | 10 | 9,8 | 1,35 | 1,18 | 1,35 | 1,40 |
| 14 | 1,1 | 15 | 10,0 | 1,20 | 1,12 | 1,3 | 1,47 |
| 15 | 0,8 | 20 | 10,4 | 1,45 | 1,15 | 1,40 | 1,45 |
| 16 | 0,85 | 25 | 10,8 | 1,20 | 1,08 | 1,3 | 1,4 |
| 17 | 0,90 | 30 | 11,2 | 1,38 | 1,15 | 1,35 | 1,52 |
| 18 | 0,95 | -20 | 11,7 | 1,40 | 1,20 | 1,3 | 1,45 |
| 19 | 1 | -15 | 12,0 | 1,25 | 1,15 | 1,4 | 1,47 |
| 20 | 1,05 | -10 | 8,8 | 1,50 | 1,30 | 1,32 | 1,4 |
| 21 | 1,1 | -5 | 9,0 | 1,65 | 1,25 | 1,34 | 1,57 |
| 22 | 0,8 | 0 | 9,3 | 1,25 | 1,10 | 1,4 | 1,45 |
| 23 | 0,85 | 5 | 9,6 | 1,35 | 1,19 | 1,3 | 1,4 |
| 24 | 0,90 | 10 | 9,8 | 1,18 | 1,25 | 1,4 | 1,52 |
| 25 | 0,95 | 15 | 10,0 | 1,24 | 1.12 | 1,35 | 1,4 |
| 26 | 1 | 20 | 10,4 | 1,65 | 1,25 | 1,40 | 1,50 |
| 27 | 1,05 | 25 | 10,8 | 1,25 | 1,10 | 1,32 | 1,40 |
| 28 | 1,1 | 30 | 11,2 | 1,35 | 1,19 | 1,35 | 1,40 |
| 29 | 0,8 | -10 | 11,7 | 1,18 | 1,25 | 1,1,3 | 1,47 |
| 30 | 0,85 | 5 | 12,0 | 1,24 | 1,12 | 1,40 | 1,45 |

*Таблица 1*

***Параметры состояния в характерных точках цикла***

| Точки цикла | $p$, бар | $v$, м$^3$/кг | $T$, К | $t$, $^0$C | $u$, кДж/кг | $h$, кДж/кг | $s$, кДж/(кг.К) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | | | | | | | |
| 1 | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | |

После расчета всех указанных величин для одного процесса, необходимо сделать проверку, удовлетворяют ли результаты расчета требованиям первого закона термодинамики:

$$q = \Delta u + l,$$

и только после этого переходить к расчету следующего процесса.

Результаты вычислений необходимо свести в таблицу 2. В последнюю строку таблицы следует вписать суммарные изменения величин $\Delta u$, $\Delta h$, $\Delta s$ за цикл, а также суммарную теплоту $q_ц$ и работу цикла $l_ц$, просуммировав соответствующие величины по вертикали.

*Таблица 2*

***Расчет термодинамических процессов***

| Величины / Процесс | $\Delta u$, кДж/кг | $\Delta h$ кДж/кг | $\Delta s$ кДж/кг.К | $q$ кДж/кг | $l$ кДж/кг |
|---|---|---|---|---|---|
| 0 – 1 | | | | | |
| 1 – 2 | | | | | |
| 2 – 3 | | | | | |
| 3 – 4 | | | | | |
| 4 – 0 | | | | | |
| За цикл: | | | | | |

На следующей странице отчета дается заголовок *«3. Расчет и анализ коэффициента полезного действия цикла».* Далее рассчитывается термический коэффициент полезного действия цикла:

$$\eta_t = 1 - q_2/q_1.$$

Здесь $q_1$ – теплота, подведенная в цикле: суммируются положительные теплоты процессов; $q_2$ – теплота, отведенная в цикле: модуль алгебраической суммы теплоты тех процессов, в которых величина $q$ отрицательна. Все указанные численные значения проще всего выбрать из таблицы 2.

Далее рассчитывается термический коэффициент полезного действия цикла Карно, выполненного в том же интервале температур:

$$\eta_{tk} = 1 - \frac{T_{min}}{T_{max}},$$

где $T_{min}$, $T_{max}$ – соответственно, минимальная и максимальная температура в характерных точках цикла. Эти температуры проще всего выбрать из таблицы 1.

Следующий шаг – вычисление относительного коэффициента полезного действия цикла:

$$\eta_0 = \frac{\eta_t}{\eta_{tk}}.$$

Далее необходимо изобразить цикл в масштабе в $p$ - $v$ и $T$ - $s$ диаграммах.

### *2.3. Пример расчета цикла*

Проведем расчет цикла для варианта «30» домашнего задания. В качестве рабочего тела взят воздух. Параметры цикла находим в строке с номером № = 30 таблицы 5.1:

$p_0 = 0{,}85$ бар $= 0{,}85 \cdot 10^5$ Па; $t_0 = 5^0C$; $\varepsilon = 12$; $\lambda = 1{,}24$; $\rho = 1{,}12$; $n_{0-1} = 1{,}4$; $n_{3-4} = 1{,}45$.

*1. Расчет параметров состояния в характерных точках цикла.*

Вычисления параметров рабочего тела начинаются с точки «0», давление и температура в которой приведены в задании. Затем аналогичные вычисления проводятся для остальных точек цикла. При выполнении всех перечисленных ниже расчетов удобно воспользоваться формулами, приведенными в методических указаниях [3]. Если за ссылкой на формулу ниже будет следовать этот номер, то формула рассмотрена в этой работе. Например, если читаем: «Соответственно, удельная энтальпия (3.20) [3]», то это ссылка на формулу (3.20) из работы [3] из списка литературы. При выполнении домашнего задания полезно выполнять расчеты, используя и те методические указания, которые вы сейчас читаете, и методические указания [3].

*1.1. Вычисление параметров состояния рабочего тела в точке «0».*

Давление и температура известны по исходным данным:

$$p_0 = 0{,}85 \text{ бар} = 0{,}85 \cdot 10^5 \text{ Па};\ t_0 = +5^oC;$$

Абсолютная температура

$$T_0 = t_0 + 273 = 5 + 273 = 278K$$

Удельный объем определяется из уравнения состояния идеального газа (1.8) [3]. Соответственно, удельная энтальпия (3.20) [3]:

$$v_0 = \frac{RT_0}{p_0} = \frac{287 \cdot 278}{0{,}85 \cdot 10^5} = 0{,}939 \frac{м^3}{кг}.$$

Удельные внутренняя энергия, энтальпия и энтропия рабочего тела могу быть определены с точностью до произвольных постоянных. Для идеального газа принимается, что эти величины обращаются в нуль при нормальных условиях, т.е. при $t_n = 0^0$ С и давлении $p_n$=760 мм. рт.ст. или $p_n$=101325Па. Из уравнения (3.19) [3] с учетом принятого начального условия находим, что:

$$u = c_v t.$$

Соответственно, удельная энтальпия (3.20) [3]:

$$h = c_p t.$$

Следовательно, в точке «0»:

$$u_0 = c_v t_0 = 718 \cdot 5 = 3590 \frac{Дж}{кг}.$$

$$h_0 = c_p t_0 = 1005 \cdot 5 = 5025 \frac{Дж}{кг}.$$

Чтобы вычислить значение удельной энтропии, нужно воспользоваться формулой (2.27) [3]. Считая за нуль отсчета энтропии состояние газа при нормальных условиях, находим:

$$s_0 = c_p \, ln \frac{T_0}{T_n} - R \, ln \frac{p_0}{p_n}.$$

Подставим в эту формулу значение давления и температуры в точке «0», а также значение температуры и давления при нормальных условиях, и найдем, что в точке «0»

$$s_0 = 1005 \, ln(\frac{278}{273}) - 287 \, ln(\frac{0{,}85}{1{,}013}) = -32{,}1 \frac{Дж}{кг \cdot К}.$$

Далее в примере расчета вычисление внутренней энергии, энтальпии и энтропии в каждой точке не повторяется. В домашнем задании эти расчеты нужно делать.

Параметры начальной точки $p_0$, $t_0$ и вычисленные величины $T_0$, $v_0$, $u_0$, $h_0$, $s_0$ заносятся в первую строку таблицы 1.

*1.2. Вычисление параметров состояния рабочего тела в точке «1».*

Удельный объем в точке «1»:

$$v_1 = v_0/\varepsilon = 0{,}939/12 = 0{,}0782 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Переход из состояния 0 в состояние 1 – политропное сжатие, т.е. процесс для которого:

$$pv^n = \text{const}.$$

Показатель политропы в процессе 0-1 $n_{0\text{-}1} = 1{,}4$. Из уравнения политропы (3.7) [3] следует, что:

$$p_0 v_0^n = p_1 v_1^n,$$

Откуда:

$$p_1 = p_0 (\frac{v_0}{v_1})^n = p_0 \varepsilon^n.$$

Степень сжатия $\varepsilon = 12$, следовательно:

$$p_1 = 0{,}85(12)^{1{,}4} = 27{,}56 \text{ бар}.$$

Температуру можно найти из уравнения состояния (1.8) [3]:

$$T_1 = \frac{p_1 v_1}{R} = \frac{27{,}6 \cdot 10^5 \cdot 0{,}0782}{287} = 752{,}5K.$$

После того как параметры состояния 1 установлены, удельные внутренняя энергия, энтальпия и энтропия вычисляются также как и в точке «0» и заносятся во вторую строку таблицы 1.

*1.3. Вычисление параметров состояния рабочего тела в точке «2».*

В состояние 2 рабочее тело переходит по изохоре, а степень повышения давления $\lambda = 1{,}24$. Следовательно:

$$v_2 = v_1 = 0{,}0782 \text{ м}^3/\text{кг}; \; p_2 = \lambda \cdot p_1 = 1{,}24 \cdot 27{,}6 = 34{,}2 \text{ бар}.$$

Температура может быть найдена из уравнения состояния идеального газа (1.8) [3]:

$$T_2 = \frac{p_2 v_2}{R} = \frac{34{,}2 \cdot 10^5 \cdot 0{,}0782}{287} = 932{,}5 \text{ К}.$$

1.3. *Вычисление параметров состояния рабочего тела в точке «3».*

Из состояния 2 в состояние 3 рабочее тело переходит по изобаре со степенью предварительного расширения ρ=1,12. Следовательно, $p_3 = p_2 = 34{,}2$ бар; $v_3 = \rho \cdot v_2 = 1{,}12 \cdot 0{,}0782 = 0{,}0876$ м$^3$/кг.

Из уравнения состояния следует:

$$T_3 = \frac{p_3 v_3}{R} = \frac{34{,}2 \cdot 10^5 \cdot 0{,}0876}{287} = 1044 \text{ К}.$$

1.4. *Вычисление параметров состояния рабочего тела в точке «4».*

Процесс расширения рабочего тела от состояния 3 до состояния 4 проходит политропно. Показатель политропы $n_{3\text{-}4}$=1,45. Удельный объём $v_4 = v_0$ =0,939 м$^3$/кг.

Из уравнения (3.8) [3] следует:

$$p_4 = p_3\left(\frac{v_3}{v_4}\right)^n = 34{,}2\left(\frac{0{,}0876}{0{,}939}\right)^{1{,}45} = 1{,}1 \text{ бар.}$$

Температура в конце процесса расширения может быть найдена из уравнений состояния:

$$T_4 = \frac{p_4 v_4}{R} = \frac{1{,}1\cdot 10^5 \cdot 0{,}939}{287} = 360 \text{ К.}$$

Результаты всех выполненных вычислений заносятся в таблицу 1, которая теперь должна быть полностью заполнена.

## *2. Расчет термодинамических процессов*

### *2.1. Процесс 0-1 – адиабатный*

Изменение внутренней энергии (формула (3.19) [3]):

$$\Delta u_{0-1} = c_v(T_1 - T_0) = 718(752{,}5 - 278) = 340690 Дж/кг.$$

Изменение энтальпии (формула (3.20) [3]:

$$\Delta h_{0-1} = c_p(T_1 - T_0) = 1005 \cdot (752{,}5 - 278) = 476870 Дж/кг.$$

Работа процесса (формула (3.14) [3]):

$$l_{0-1} = \frac{R}{n_{0-1}-1}(T_0 - T_1) = \frac{287}{1{,}4-1}(278 - 752{,}5) = -340450 \text{ Дж/кг.}$$

Теплоемкость процесса $c_{0-1} = 0$, так как процесс адиабатный $(n_{0-1} = k)$. Этот вывод может быть получен и чисто формальным путем, исходя из формулы (3.18) [3]:

$$c_{0-1} = c_v\frac{n_{0-1} - k}{n_{0-1} - 1} = 722\frac{1{,}4 - 1{,}4}{1{,}4 - 1} = 0.$$

Теплота процесса может быть определена на основе формулы (3.17) [3]:

$$q_{0-1} = c_{0-1}(T_1 - T_0) = 0(752{,}5 - 278) = 0$$

Изменение энтропии можно рассчитать с помощью уравнения (3.21) [3]:

$$\Delta s_{0-1} = c_{0-1}\, ln\frac{T_1}{T_0} = 0 \cdot ln\frac{752{,}5}{278} = 0.$$

Три последних параметра процесса 0-1 можно было бы определить и без использования расчетных формул, а лишь вспомнив, что $n_{0-1} = k$, т. е. что процесс адиабатный. Формальный расчет приведен для того, чтобы подчеркнуть, что используемые уравнения универсальны и пригодны для расчета любого процесса, кроме изотермического.

### *2.2. Процесс 1-2 – изохорный.*

Изменение внутренней энергии (формула (3.19) [3]):

$$\Delta u_{1-2} = c_v(T_2 - T_1) = 718(932{,}5 - 752{,}5) = 129240 Дж/кг.$$

Изменение энтальпии (формула (3.20) [3]:

$$\Delta h_{1-2} = c_p(T_2 - T_1) = 1005 \cdot (932{,}5 - 752{,}5) = 180900 Дж/кг.$$

Теплоемкость процесса: $c_{1-2} = c_v$

Изменение энтропии находим из уравнения (3.25) [3]:

$$\Delta s_{1-2} = c_v \, ln\frac{T_2}{T_1} = 718 \cdot ln\frac{932{,}5}{752{,}5} = 153{,}0\,\frac{Дж}{кг \cdot К}.$$

Теплота подведенная в процессе, в соответствии с уравнением (3.27) [3], расходуется на увеличение внутренней энергии :

$$q_{1-2} = \Delta u_{1-2}.$$

Работа процесса: $l_{1-2} = 0$.

*2.3. Процесс 2-3 – изобарный.*

Изменение внутренней энергии (формула (3.19) [3]):

$$\Delta u_{2-3} = c_v(T_3 - T_2) = 718(1044 - 932{,}5) = 80060 Дж/кг.$$

Изменение энтальпии (формула (3.20) [3]):

$$\Delta h_{2-3} = c_p(T_3 - T_{21}) = 1005 \cdot (1044 - 932{,}5) = 112060 Дж/кг.$$

Теплоемкость процесса: $c_{2-3} = c_p$

Изменение энтропии находим из уравнения (3.30) [3]:

$$\Delta s_{2-3} = c_p \, ln\frac{T_3}{T_2} = 1005 \cdot ln\frac{1044}{932{,}5} = 113{,}5\,\frac{Дж}{кг \cdot К}.$$

Теплота подведенная в процессе, в соответствии с уравнением (3.32) [3], расходуется на увеличение энтальпии:

$$q_{2-3} = \Delta h_{2-3}.$$

Работа процесса, в соответствии с формулой (3.31) [3], равна

$$l_{2-3} = p(v_3 - v_2) = 34{,}2 \cdot 10^5(0{,}0876 - 0{,}0782) = 32150 \text{ Дж/кг}.$$

*2.4. Процесс 3-4 – политропный*

Изменение внутренней энергии (формула (3.19) [3]):

$$\Delta u_{3-4} = c_v(T_4 - T_3) = 718(360 - 1044) = -491110 Дж/кг.$$

Изменение энтальпии (формула (3.20) [3]):

$$\Delta h_{3-4} = c_p(T_4 - T_3) = 1005 \cdot (360 - 1044) = -687420 Дж/кг.$$

Работа процесса (формула (3.14) [3]):

$$l_{3-4} = \frac{R}{n_{3-4}-1}(T_3 - T_4) = \frac{287}{1{,}45-1}(1044 - 360) = 436240\ Дж/кг.$$

Теплоемкость процесса, исходя из формулы (3.18) [3]:

$$c_{3-4} = c_v \frac{n_{3-4}-k}{n_{3-41}-1} = 718\frac{1{,}45-1{,}4}{1{,}45-1} = 79{,}78\ Дж/кгК.$$

Теплота процесса может быть определена на основе формулы (3.17):

$$q_{3-41} = c_{3-4}(T_4 - T_3) = 79{,}78(360 - 1044) = -54570\ Дж/кг.$$

Изменение энтропии можно рассчитать с помощью уравнения (3.21) [3]:

$$\Delta s_{3-4} = c_{3-4} \, ln\frac{T_4}{T_3} = 79{,}78 \cdot ln\frac{360}{1044} = -84{,}94\ Дж/кгК.$$

*2.5. Процесс 4-0 – изохорный.*

Изменение внутренней энергии (формула (3.19) [3]):

$$\Delta u_{4-0} = c_v(T_0 - T_4) = 718(278 - 360) = -58880 Дж/кг.$$

Изменение энтальпии (формула (3.20) [3]):

$$\Delta h_{4-0} = c_p(T_0 - T_4) = 1005 \cdot (278 - 360) = -82410 Дж/кг.$$

Теплоемкость процесса: $c_{4-0} = c_v$

Изменение энтропии находим из уравнения (3.25) [3]:

$$\Delta s_{4-0} = c_v \, ln\frac{T_0}{T_4} = 718 \cdot ln\frac{278}{360} = -185{,}6\,\frac{Дж}{кг \cdot К}.$$

Теплота процесса соответствует (уравнение (3.27) [3]), соответствует изменению внутренней энергии рабочего тела:

$$q_{4-0} = \Delta u_{4-0}.$$

Работа процесса: $l_{4-0} = 0$.

Численные значения, найденные при расчете процессов необходимо записать в таблицу 2. В последней строке этой таблицы записывается алгебраическая сумма величин, входящих в данный столбец.

*3. Расчет и анализ коэффициента полезного действия цикла.*

Теплота, подведенная к рабочему телу в цикле, определяется как сумма $q$ процессов, теплота которых положительна. Для рассматриваемого цикла получаем: $q_1 = 241300$ Дж/кг

Работа цикла определяется как алгебраическая сумма работ всех процессов, из которых он состоит. Для рассматриваемого цикла получаем: $l_ц = 127940$ Дж/кг.

Термический коэффициент полезного действия цикла

$$\eta_t = l_ц / q_1 = 127940/241300 = 0{,}53.$$

Максимальная температура в цикле $T_{max}$ К, а минимальная $T_{min}$ К. Цикл Карно, имеющий соответствующие температуры подвода и отвода теплоты от рабочего тела имеет коэффициент полезного действия

$$\eta_{tk} = 1 - \frac{T_{min}}{T_{max}=1-\frac{278}{1044}=0{,}734}.$$

Относительный коэффициент полезного действия рассчитанного цикла

$$\eta_0 = \eta_t / \eta_{tk} = 0{,}53/0{,}734 = 0{,}72.$$

На основании выполненных расчетов можно сделать вывод, что к.п.д. рассчитанного цикла Тринклера составляет 0,72 от к.п.д. Цикла Карно, осуществляемого в том же интервале температур. Это свидетельствует о достаточно высокой эффективности рассчитанного цикла.

*4. Графическое построение цикла.*

Необходимо изобразить рассчитанный цикл в $p - v$ и $T - s$ диаграммах в масштабе. Координаты характерных точек цикла 0,1,2,3,4 можно взять из таблицы 1. Кроме того, для определения характера кривых, для каждого из процессов необходимо рассчитать положение хотя бы одной промежуточной точки. Так, например, при построении изохоры 1-2 в $T - s$ диаграмме нужно, задавшись промежуточным значением температуры $T_c = (T_1 + T_2)/2$, рассчитать промежуточное значение энтропии $s_c$ в этом процессе.

## 5. Вопросы к зачету (второй семестр)

1. Какую взаимосвязь устанавливает техническая термодинамика?
2. На каких законах основывается термодинамика?
3. Какими параметрами характеризуется термодинамическое состояние системы и каково
их содержание?
4. Что называется термодинамической системой?
5. Дать определение гомогенной и гетерогенной систем.
6. Что представляет собой термодинамический процесс и каким он бывает?
7. В чем различие между абсолютным и манометрическим (избыточным) давлением?
8. Как определяется высота столба жидкости для измерения давления?
9. Какие температурные шкалы приняты в России?
10. Что называется абсолютной температурой?
11. Определение удельного объема и плотности газа.
12. Какова связь между интенсивными параметрами состояния?
13. Что отображает уравнение состояния идеальных газов в пространстве?
14. Какими диаграммами изображается состояние вещества согласно термодинамической поверхности?
15. Зачем в техническую термодинамику вводится понятие об идеальном газе?
16. Характеристическое уравнение состояния для идеального газа.
17. Что называется молем (киломолем) газа?
18. Определение идеального газа.
19. Законы Бойля – Мариотта и Гей-Люссака: формулировки и уравнения.
20. Характеристическое уравнение состояния для идеального газа.
21. На каких законах основан вывод уравнения состояния Клапейрона?
22. Размерность всех величин, входящих в уравнение Клапейрона.
23. Размерность газовой постоянной и ее физический смысл.
24. Что такое газовая смесь?
25. Как формулируется закон Дальтона?
26. Что понимается под парциальным давлением?
27. Как выражаются массовая, объемная и мольная доли компонентов газовой смеси?
28. Что называется парциальным (приведенным) объемом данного газа в смеси?
29. Как вычисляется средний молекулярный вес смеси?
30. Какая существует зависимость между газовой постоянной смеси и его молекулярной массой?
31. Почему молекулярная масса смеси называется средней молекулярной массой?

32. Как производится пересчет массового состава в объемный и объемного в массовый?

33. Как определяется парциальное давление газа в смеси по массовым и объемным долям?

34. Как определяются удельный объем и плотность смеси газов?

35. Чем отличаются реальные газы от идеальных?

36. Что называется коэффициентом сжимаемости?

37. Что положено в основу вывода уравнения Ван-дер-Ваальса?

38. Какой смысл имеет константа $b$ уравнения Ван-дер-Ваальса?

39. Какая величина называется внутренним давлением газа?

40. Уравнение Ван-дер-Ваальса для 1 кг газа.

41. При каких условиях можно превращать газы в жидкое состояние?

42. В чем заключается силовая ассоциация молекул?

43. Что положено в основу вывода уравнения состояния М.П. Вукаловича и И.И. Новикова?

44. Что понимают под удельной теплоемкостью?

45. Дать определение массовой, объемной и мольной теплоемкостям.

46. Что называется средней теплоемкостью?

47. Что называется истинной теплоемкостью?

48. Что такое теплоемкость при постоянном объеме и теплоемкость при постоянном давлении?

49. Как записывается и какой смысл уравнения Майера?

50. Какой смысл показателя адиабаты $k$ и как он определяется?

51. Почему удельная теплоемкость при постоянном давлении всегда больше удельной теплоемкости при постоянном объеме?

52. Каким выражением устанавливается зависимость истинной теплоемкости реальных газов от температуры?

53. Какими уравнениями вычисляется средняя теплоемкость?

54. Что представляет собой теплоемкость газовой смеси и как она вычисляется?

55. Дайте определение основным термодинамическим процессам.

56. Изобразите графически изохору, изобару, изотерму и адиабату в $p$, $\upsilon$- и $T$, $s$-координатах.

57. Напишите уравнения основных процессов.

58. Напишите формулы соотношений между основными параметрами для каждого процесса.

59. Напишите формулы удельной работы изменения объема для каждого процесса.

60. Напишите формулы располагаемой (полезной) работы для каждого процесса.

61. При каком условии основные процессы идеального газа будут политропными?

62. Напишите уравнение политропы и укажите, в каких пределах изменяется показатель политропы.

63. Укажите значения показателя политропы для основных процессов.

## 6. Экзаменационные вопросы (третий семестр)

1. Можно ли в круговом процессе превратить всю подведенную теплоту в работу?

2. Основные формулировки второго закона термодинамики.

3. Какие требуются условия для создания непрерывного процесса превращения теплоты в работу?

4. Какие бывают циклы?

5. Что называется термическим КПД?

6. Вывод выражения для термического КПД обратимого цикла Карно.

7. В каких случаях термический КПД цикла Карно может быть равен единице?

8. Можно ли получить термический КПД цикла теплового двигателя, больший термического КПД цикла Карно?

9. Обратимый цикл Карно.

10. Что такое холодильный коэффициент и как он определяется?

11. Свойство обратимых циклов Карно и первый интеграл Клаузиуса.

12. Свойства необратимых циклов Карно и второй интеграл Клаузиуса.

13. Каково изменение энтропии в замкнутой адиабатной системе, если в ней протекают обратимые и необратимые процессы?

14. Что выражает термодинамическое тождество?

15. Какими особенностями обладают термодинамические функции?

16. Какие термодинамические функции считаются основными?

17. Какими независимыми переменными определяется каждая из основных термодинамических функций?

18. Что такое изохорно-изотермический потенциал и связанная энергия?

19. Физический смысл изохорно-изотермического потенциала.

20. Из каких величин составляется общая энергия системы?

21. Уравнение максимальной работы Гиббса – Гельмгольца при постоянных $TV$ и $Tp$.

22. Какие величины называются термодинамическими потенциалами?

23. Что представляет собой химический потенциал?

24. На какие классы делятся термодинамические системы?

25. Фазовые превращения первого и второго рода.

26. Какое состояние называется стабильным, лабильным, метастабильным?

27. Какие условия необходимо осуществлять для устойчивого равновесия термодинамической системы?

28. Что называется кипением, парообразованием и испарением?

29. Какие процессы называются сублимацией и десублимацией?

30. Какой пар называется влажным насыщенным, сухим насыщенным перегретым?

31. Что такое степень сухости и степень влажности?

32. Изобразить $p$, $v$-диаграмму водяного пара.

33. Какие точки располагаются на пограничных кривых жидкости и пара?

34. Что относится к параметрам критической точки?

35. *T*, *s*-диаграмма водяного пара.

36. *i*, *s*-диаграмма водяного пара.

37. Написать уравнение первого закона термодинамики для потока.

38. Объяснить все величины, входящие в уравнение для потока.

39. Какие каналы называются соплами и диффузорами?

40. Какое состояние называется стационарным?

41. Написать уравнение неразрывности для потока.

42. Вывод уравнения работы проталкивания.

43. Уравнение первого закона термодинамики для потока с применением энтальпии.

44. Вследствие чего происходит изменение внешней кинетической энергии рабочего тела при адиабатном процессе истечения?

45. Какая величина называется располагаемой работой?

46. Графическое изображение располагаемой работы в *p*, *υ*-диаграмме.

47. Уравнение располагаемой работы для политропного и адиабатного процессов.

48. Уравнение располагаемой работы при адиабатном процессе с применением энтальпии.

49. Скорость истечения жидкости при адиабатном процессе.

50. Скорость истечения идеального газа при адиабатном процессе.

51. Массовый расход идеального газа.

52. Основные условия течения по каналам переменного сечения.

53. Дать описание комбинированного сопла Лаваля.

54. Как определяется скорость истечения и массовый расход газа при выходе из сопла Лаваля?

55. Как определяются площади минимального и выходного сечений сопла Лаваля?

56. Как определяется длина сопла Лаваля?

57. Какой процесс называется дросселированием и где он встречается?

58. Какие величины изменяются и какие остаются постоянными за суженным отверстием?

59. Уравнение процесса дросселирования.

60. Почему процесс дросселирования нельзя назвать изоэнтальпийным?

61. Как изменяется температура идеального газа при дросселировании?

62. Эффект Джоуля – Томсона и его уравнение.

63. Что такое дифференциальный и интегральный эффекты дросселирования?

64. Дросселирование реальных газов.

65. Что называется точкой и температурой инверсии?

66. Дифференциальный эффект Джоуля – Томсона для газов, подчиняющихся уравнению Ван-дер-Ваальса.

67. Когда и при каких условиях температура реального газа при дросселировании повышается, понижается и остается без изменения?

68. Исследование процесса дросселирования водяного пара по *i*, *S*-

диаграмме.

69. Изменение работоспособности водяного пара при дросселировании.

70. Что входит в состав влажного воздуха?

71. Что называется абсолютной и относительной влажностью воздуха?

72. Что означает влагосодержание воздуха и как оно вычисляется?

73. Что называется температурой точки росы и температурой мокрого термометра?

74. Для чего служит прибор психрометр и что он позволяет вычислять?

75. Что означает энтальпия влажного воздуха и как она определяется аналитически?

76. Чем вызвано создание газовых турбин?

77. Дать описание ГТУ с горением топлива при $p = const$. Вывести выражение для термического КПД.

78. Дать описание ГТУ с горением топлива при $\upsilon = const$. Вывести выражение для термического КПД.

79. Каков характер зависимости термического и эффективного КПД ГТУ с подводом теплоты при $p = const$ в зависимости от степени повышения давления?

80. Каковы методы повышения термического КПД ГТУ?

81. Как выглядит принципиальная схема и цикл в $p$, $V$- и $T$, $S$-диаграммах ГТУ с подводом теплоты при $p = const$ и регенерацией теплоты?

82. Как выглядит цикл ГТУ с многоступенчатым сжатием и промежуточным охлаждением в $p$, $V$- и $T$, $S$-координатах? В чем особенность такого цикла?

## 7. Примеры задач для практических занятий

**Задача 1:** Определить скорость истечения пара из котла в атмосферу, если его давление $P_1$ = 12 бар и температура $t_1$ = 300 °С. Барометрическое давление равно $P_б$ = 750 ммHg.

Задачу решить для двух условий:

а) истечение происходит через цилиндрическое сопло;

б) через расширяющиеся сопло.

Изобразить процесс истечения в h – S координатах.

Решение: Отношение давлений $P_2/P_1 = 1/12 = 0{,}0834 < (0{,}546 = \beta_{кр})$. В первом случае давление в выходном сечении не может быть меньше $P_{кр}$, которое определяется как

$P_{2кр} = P_1\beta_{кр} = 12$ бар $\cdot\ 0{,}546 = 6{,}6$ бар.

Тогда скорость истечения будет критической и равна (значение энтальпии находится по диаграмме h – S.

$$w_{КР} = 44{,}76\sqrt{h_1 - h_{2КР}} = 44{,}76 \times \sqrt{148_кДж/кг} = 545_м/с.$$

Во втором случае давление в выходном сечении может быть меньше критического, а именно равно атмосферному $P_2$ = 1 бар, и тогда скорость истечения будет больше критической.

$$w_2 = 44{,}76\sqrt{h_1 - h_2} = 44{,}76 \times \sqrt{492_кДж/кг} = 993_м/с.$$

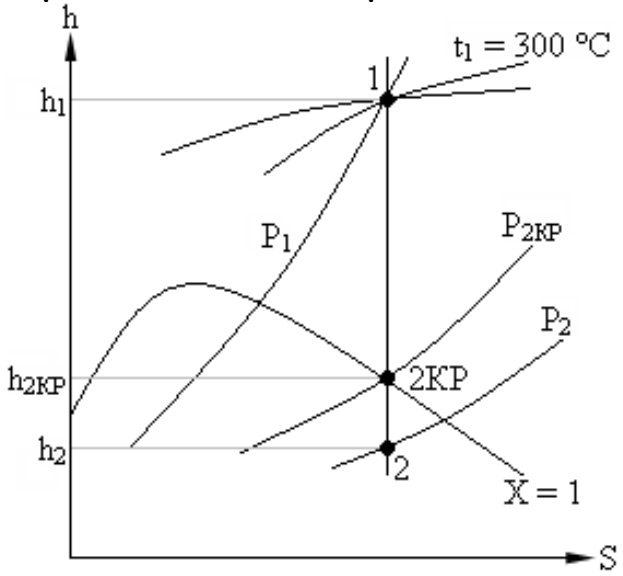



Рис. 1.

**Задача 2:** Пар с давлением $P_1$ = 18 бар и температурой $t_1$ = 250 °С дросселируется до $P_2$ = 10 бар. Определить параметры и функции состояния пара и степень перегрева в конце процесса дросселирования.

Решение: По диаграмме h – S находим начальное состояние пара, точка 1. Принимая $h_1 = h_2$, находим конечное состояние пара, точка 2.

Степень перегрева пара определяется как:

$\Delta t_{n1} = t_{n1} - t_{h1} = 250$ °С – 208 °С = 42 °С,

$\Delta t_{n2} = t_{n2} - t_{h2} = 234$ °С – 180 °С = 54 °С.

Параметры и функции состояния пара:

$v_1 = 0{,}125$ м$^3$/кг; $S_1 = 6{,}61$ кДж/(кг·К); $u_1 = 2889$ кДж/кг; $h_1 = h_2 = 2911$ кДж/кг; $v_2 = 0{,}225$ м$^3$/кг; $S_2 = 6{,}86$ кДж/(кг·К); $u_2 = 2887$ кДж/кг.

**Задача 3:** Паросиловая установка работает по циклу Ренкина с начальными параметрами пара $P_1 = 20$ бар, $t_1 = 300$ °С. Давление в конденсаторе $P_2 = 0{,}04$ бар. Определить термический КПД цикла и построить его в T – S координатах.

Решение: По диаграмме h – S находим энтальпии пара в начальном и конечном состояниях: $h_1 = 3019$ кДж/кг; $h_2 = 2036$ кДж/кг; $h_2' = 121$ кДж/кг.

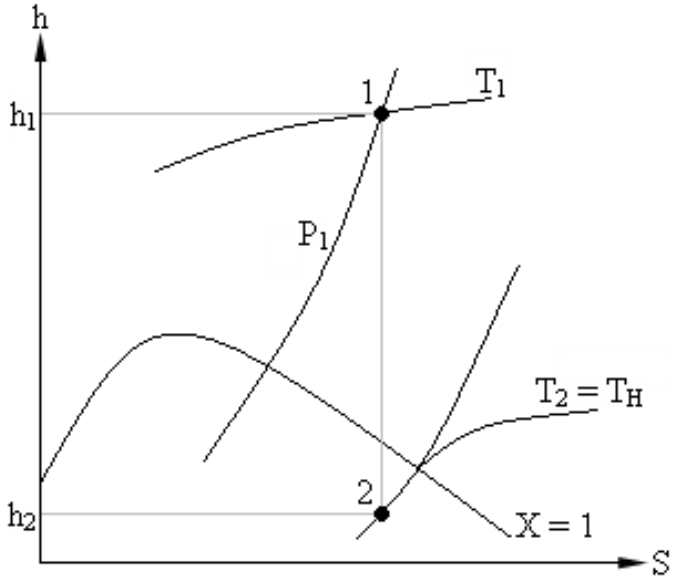



Рис. 2.

Термический КПД цикла определяется как:

$\eta_T = (h_1 – h_2) /(h_1 – h'_2) = (3019 – 2036) /(3019 – 121) = 0{,}3392.$

**Задача 4:** Холодильная установка работает по циклу Карно, рабочее тело – пар аммиака. Параметры пара t1 = – 10 °С, t2 = 20 °С X2 = 1 а X3 = 0 (см. рис. 3.4). Определить холодопроизводительность аммиака, тепловую нагрузку конденсатора, работу, затраченную в цикле и холодильный коэффициент.

Решение: Параметры пара аммиака определяются по табл. 8 [1].

Холодопроизводительность установки:

$q_0 = h_1 – h_4 = r_1(X_1 – X_4).$

При $t_1 = – 10$ °С и $r_1 = 1296{,}6$ кДж/кг принимая процессы 1 – 2 и 3 – 4 адиабатным, имеем:

$S_2 = S_1 = S' + (S''_1 + S'_1)\cdot X.$

$S'_1 = 4{,}071$ кДж/(кг·К), $S''_1 = 8{,}944$ кДж/(кг·К).

$S_2 = S''_2 = 8{,}566$ кДж/(кг·К).

$X_1 = (S''_2 – S'_1) /(S''_1 – S'_1) = (8{,}566 – 4{,}071) /(8{,}944 – 4{,}071) = 0{,}9224.$

$X_4 = (S''_2 – S'_1) /(S''_1 – S'_1) = (4{,}516 – 4{,}017) /4{,}917 = 0{,}1015.$

Следовательно:

$q_0 = 1296{,}6 \cdot (0{,}9224 – 0{,}1015) = 1064{,}4$ кДж/кг.

Тепловая нагрузка конденсатора:

$q = h_2 – h_3 = r_2 = 1186{,}9$ кДж/кг.

Работа, затраченная в цикле:
$l = q - q_0 = 1186,9 - 1064,4 = 122,5$ кДж/кг.
Холодильный коэффициент:
$\varepsilon_X = q_0/l = 1064,4/122,5 = 8,69$.

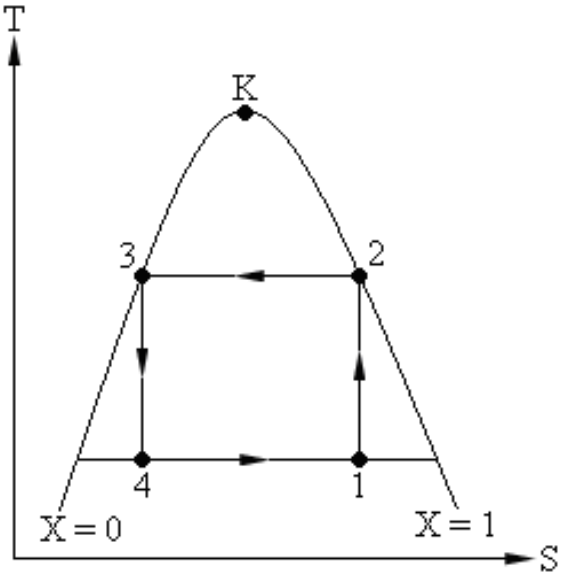



Рис. 3.

**Задача 5:** Определить холодильный коэффициент холодильной установки, работающей по влажному циклу Карно, если температура в испарителе – 30 °С, а в конденсаторе 27 °С.

Решение:

$\varepsilon_X = T_0/(T - T_0) = (273,15 - 30)/((273,15 - 27) - (273,15 - 30)) = 4,27$.

**Задача 6:** Определить количество получаемого в 1 ч жидкого воздуха и необходимые для этого затраты мощности при переработке 200 кг/ч воздуха, сжатого до $P_2 = 200$ атм. Установка работает по циклу Линде. Температура воздуха до и после компрессора 25 °С. Воздух дросселируется до $P_1 = 1$ атм потери холода в окружающую среду принять в размере 4,19 кДж на 1 $нм^3$ воздуха (при нормальных условиях). Недорекуперация 5 °С. $\eta_{кэф} = 0,62$.

Решение: Согласно [1], формулам (10.2) – (10.4), пользуясь TS диаграммой для воздуха находим:

$h_1 = 510$ кДж/кг; $h_2 = 474$ кДж/кг, $h_0 = 92,1$ кДж/кг,

$q_{нр} = C_p \Delta t = 1,01 \cdot 5 = 5,05$ кДж/кг;

$q_0 = 4, 19/\rho_h = 4, 19/1,29 = 3,25$ кДж/кг.

$$y' = \frac{h_1 - h_2 - (q_0 + q_{НР})}{h_1 - h_0} = \frac{510 - 474 - (3,25 + 5,05)}{510 - 92,1} = 0,0663.$$

$$N = \frac{RT_1 \ln \frac{P_2}{P_1}}{\eta^K_{ЭФФ}} = \frac{8,314 \times (25 + 273,15) \times \ln \frac{200}{1}}{0,62 \times 2,896 \times 10^{-2} \times 3600} = 0,203 _ \frac{кВт}{кг_пер_г}.$$

$$N' = \frac{N}{y'} = \frac{0,203}{0,0663} = 3,062 _ \frac{кВт}{кг_ож_г}.$$

## 8. Примеры тестовых заданий

**1. Назовите термодинамические параметры состояния:**

1. масса, плотность, удельный вес
2. давление, удельный объем, температура
3. работа, теплоемкость, теплота
4. молекулярная масса, объем, газовая постоянная

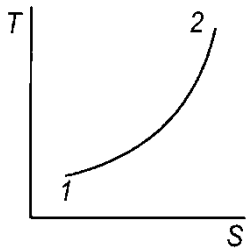
Правильный ответ: 2

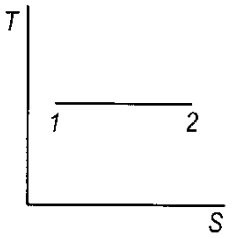
**2. Уравнение состояния идеального газа это:**

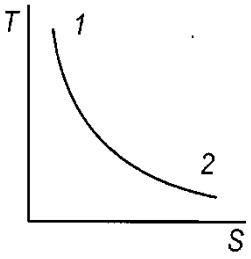
1. $P_1 \cdot V_1 = P_2 \cdot V_2$
2. $\frac{P_1}{P_2} = \frac{\rho_1}{\rho_2}$
3. $PV = mRT$
4. $L = R \cdot T \cdot ln\frac{V_2}{V_1}$

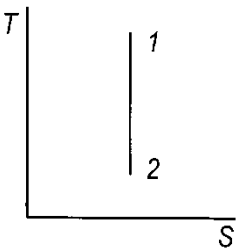
Правильный ответ: 3

**3. На какой из диаграмм изображен изотермический процесс?**

1. 


2. 


3. 


4. 


Правильный ответ: 2

**4. Чему равна работа в изохорном процессе?**

1. $L = m \cdot R \cdot T \cdot ln\frac{V_2}{V_1}$
2. $L = 0$
3. $L = m \cdot P \cdot (V_2 - V_1)$
4. $L = \frac{m}{\kappa - 1} \cdot (P_1 \cdot V_1 - P_2 \cdot V_2)$

Правильный ответ: 2

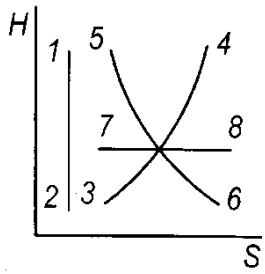
**5. Для какого термодинамического процесса справедливо соотношение $\frac{P_1}{P_2} = \frac{T_1}{T_2}$?**

1. изобарный

2. изохорный
3. изотермический
4. адиабатный.

Правильный ответ: 2

**6. Какая из кривых на диаграмме изображает адиабатный процесс?**




1. 1–2
2. 3–4
3. 5–6
4. 7–8

Правильный ответ: 1

**7. В изобарном процессе температура газа при расширении:**

1. уменьшается
2. остается постоянной
3. увеличивается
4. равна 0

Правильный ответ: 3

**8. Чему равно изменение внутренней энергии в изотермическом процессе?**

1. $\Delta U = c_v \cdot (T_2 - T_1)$
2. $\Delta U = 0$
3. $\Delta U = c_p \cdot (T_2 - T_1)$
4. $\Delta U = c_v \cdot (T_1 - T_2)$

Правильный ответ: 2

**9. Чему равно количество теплоты в адиабатном процессе?**

1. $q = c_v \cdot (T_2 - T_1)$
2. $q = 0$
3. $q = c_p \cdot (T_2 - T_1)$
4. $q = R \cdot T \cdot ln\frac{P_1}{P_2}$

Правильный ответ: 2

**10. Какое соотношение верно?**

1. $\frac{c_p}{c_v} > 1$ 2. $\frac{c_p}{c_v} < 1$ 3. $\frac{c_p}{c_v} = 1$ 4. $\frac{c_p}{c_v} = 0$

Правильный ответ: 1

**11. Чем отличаются массовая c, объемная c′ и мольная $c_\mu$ теплоемкости?**

1. температурой рабочего тела
2. количеством тепла, подводимого к рабочему телу
3. единицей измерения количества рабочего тела
4. параметрами, при которых происходит процесс

Правильный ответ: 3

**12. Способы задания состава газовой смеси:**

1. массовыми, объемными, мольными долями
2. по химическому составу компонентов
3. по количеству атомов, входящих в состав смеси компонентов
4. по химической активности компонентов

Правильный ответ: 1

**13. Аналитическое выражение первого закона термодинамики:**

1. $PV = m \cdot R \cdot T$
2. $P_1 \cdot V_1^\kappa = P_2 \cdot V_2^\kappa$
3. $q = c_p \cdot (T_2 - T_1)$
4. $q = \Delta U + l$

Правильный ответ: 4

**14. Назовите калорические параметры состояния:**

1. теплота, работа, теплоёмкость
2. внутренняя энергия, энтальпия, энтропия
3. молекулярная масса, парциальное давление, температура
4. коэффициент Пуассона, показатель политропы, газовая постоянная

Правильный ответ: 2

**15. Какая величина остается постоянной в политропном процессе в идеальном газе?**

1. давление
2. температура
3.теплоёмкость
4. объём

Правильный ответ: 3

**16. Чему равен показатель политропы «n» для изобарного процесса?**

1. $n = \pm\infty$
2. $n = 0$
3. $n = 1$
4. $n = \kappa$

Правильный ответ: 2

**17. Площадь под кривой процесса в PV-координатах численно равна:**

1. теплоте
2. энтальпии
3. работе
4. объёму

Правильный ответ: 3

**18. Площадь под кривой процесса в TS-координатах численно равна:**

1. работе
2. теплоёмкости
3. теплоте
4. температуре

Правильный ответ: 3

**19. Если тепло к газу подводится, то энтропия**

1. уменьшается
2. увеличивается
3. остается постоянной
4. зависит от изменения температуры

Правильный ответ: 2

**20. При увеличении объёма газа работа**

1. совершается
2. затрачивается
3. остается постоянной
4. зависит от давления

Правильный ответ: 1