

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по УМР
_____ В.В.Криницин
« ____ » _____ 2007г.

РАБОЧАЯ УЧЕБНАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

«Термодинамика и теплопередача», СД.04
(наименование, шифр по ГОС)

Специальность **160901 Техническая эксплуатация летательных аппаратов и двигателей**
(шифр по ГОС)

Факультет - **Механический**
Кафедра - **Двигатели летательных аппаратов**
Курс - **3** Форма обучения - **очная** Семестр **5**

Общий объём учебных часов на дисциплину - **110** (ч.)
Объём аудиторных часов - **60** (ч.) , в том числе:
Лекции - **32** (ч.)
Лабораторные занятия - **28** (ч.)
Самостоятельная работа - **50** (ч.)
Контрольное домашнее задание - **3 курс (семестр – 5-й)**
Зачет - **3 курс (семестр – 5-й)**

Москва – 2007

Рабочая учебная программа составлена на основании примерной учебной программы дисциплины и в соответствии с государственными требованиями к минимуму содержания и уровню подготовки выпускника по специальности.

Рабочую учебную программу составил:
Шулекин В.Т., доцент, к.т.н.
(Ф.И.О., звание, степень) (подпись)

Рабочая учебная программа утверждена на заседании кафедры,
протокол
№ ___ от «___» _____ 2007г.

Заведующий кафедрой Никонов В.В., проф., д.т.н.
(Ф.И.О., звание, степень) (подпись)

Рабочая учебная программа одобрена методическим советом
специальности 160901 Техническая эксплуатация летательных аппаратов
и двигателей
(наименование специальности)

«___» _____ 2007 г. протокол № ___.

Председатель методического совета Чинючин Ю.М., проф., д.т.н.
(Ф.И.О., звание, степень)

(подпись)

Рабочая учебная программа согласована с Учебно-методическим
управлением (УМУ)
Начальник УМУ Логачев В.П., доц., к.т.н.
(Ф.И.О., звание, степень) (подпись)

1. Цели и задачи дисциплины

1.1. Цель преподавания дисциплины

Цель преподавания дисциплины «Термодинамика и теплопередача» состоит в изучении:

- термодинамических процессов, составляющих циклы современных и перспективных тепловых машин;
- основных закономерностей преобразования теплоты в работу в тепловых машинах;
- основных законов энергообмена в газовых потоках;
- основных законов теплопроводности, конвективного теплообмена, теплового излучения и сложного теплообмена (теплопередачи).

1.2. Задачи изучения дисциплины (необходимый комплекс знаний и умений).

1.2.1. Иметь представление о проблемах технической термодинамики и теплообмена в авиационных газотурбинных двигателях гражданской авиации и обеспечении летной годности воздушных судов и их силовых установок в процессе эксплуатации.

1.2.2. Знать:

- термодинамические процессы, составляющие циклы тепловых машин;
- основные законы преобразования теплоты в работу в авиационных двигателях;
- современные методы анализа эффективности циклов тепловых машин;
- принципы работы авиадвигателей;
- особенности теплообмена в авиационных двигателях;
- методы поиска и устранения неисправностей авиадвигателей на основе анализа их работы как тепловых машин.

1.2.3. Уметь:

- производить анализ эффективности термодинамических процессов, в которых осуществляется преобразование теплоты в работу;
- осуществлять анализ безопасной работы и оценки эффективности циклов тепловых установок;
- производить расчеты различных видов теплообмена при взаимодействии рабочего тела с конструкцией авиационных двигателей.

1.2.4. Иметь навыки:

- в определении параметров состояния рабочего тела в контрольных точках циклов авиационных двигателей;
- в оценке эффективных различных циклов тепловых установок;
- в определении основных параметров теплообмена при регенерации тепла в силовых установках летательных аппаратов.

2. Содержание дисциплины

2.1. Наименование разделов (подразделов) , объём часах. Содержание лекций, ссылки на литературу

Раздел 1 . Уравнение состояния, виды уравнения состояния. Реальный и идеальный газ. 2 часа

Тема 1.1. Уравнение состояния реальных и идеальных газов

Предмет курса термодинамики и теплопередачи. Значение курса в подготовке инженера-механика по технической эксплуатации летательных аппаратов и авиационных двигателей в обеспечении безопасности полетов летательных аппаратов гражданской авиации. Краткий исторический очерк. Роль отечественных учёных в развитии данной науки.

Краткая характеристика идеального и реального газа. Газовая постоянная для идеального газа и её роль при оценке эффективности использования отработавших ресурс авиадвигателей в других отраслях промышленности.

Уравнение состояния идеального газа в дифференциальной и интегральной формах. Понятие о деформационной и технической работах при взаимодействии рабочего тела с внешней средой. Уравнение состояния для реального газа.

Литература: [1,2,3,4]

Раздел 2. Теплоёмкость. Виды теплоёмкости. Теплоёмкость смеси газов. 2 часа

Тема 2.1. Теплоёмкость рабочего тела авиационных двигателей

Определение теплоёмкости рабочего тела. Понятие об удельной массовой, объёмной, мольной и других видах теплоёмкости и их практическое использование в авиационной и космической технике.

Зависимость теплоёмкости от температуры рабочего тела. Теплоёмкость смеси газов.

Литература: [1,2,3,4]

Раздел 3. Основные термодинамические законы. 2 часа

Тема 3.1. Основные термодинамические процессы в авиадвигателях

Первый и второй законы термодинамики. Изохорный, изобарный, изотермический, адиабатный и политропный процессы и примеры их использования в авиационной и космической технике. Энергетические показатели политропного процесса Особенности преобразования теплоты в работу в названных процессах.

Литература: [1,2,3,4]

Раздел 4. Циклы тепловых двигателей. Цикл Брайтона и его применение в ГТД. Цикл Гемфри, его применение в авиационной и космической технике. 4 часа

Тема 4.1. Циклы тепловых двигателей

Цикл Н.Л.С. Карно (1824г.) – базовый цикл для тепловых двигателей. Энергетические показатели цикла Карно. Термический КПД цикла Карно.

Циклы Н.А. Отто (1876г.), Р. Дизеля (1897г.) и их применение в поршневых двигателях внутреннего сгорания. Энергетические показатели циклов Отто и Дизеля. Оценка эффективности термодинамического совершенства циклов Отто и Дизеля.

Литература: [1,2,3,4]

Тема 4.2. Циклы газотурбинных двигателей

Цикл Брайтона газотурбинных двигателей, обеспечивший качественный скачок в развитии авиации. Энергетические показатели цикла Брайтона и оценка его термодинамического совершенства.

Цикл Гемфри газотурбинной установки с подводом теплоты при $v=const$. Энергетические показатели цикла Гемфри и оценка его термодинамического совершенства.

Регенеративные циклы. Оценка термодинамического совершенства регенеративных циклов авиационных ГТД.

Литература: [1,2,3,4]

Раздел 5. Уравнения движения газового потока. Газовая динамика сверхзвуковых газовых течений. 2 часа

Тема 5.1. Уравнения движения газового потока

Система основных уравнений движения для потока газа. Уравнение неразрывности. Уравнение сохранения энергии. Уравнение Бернулли. Уравнения Эйлера о количестве движения и о моменте количества движения.

Параметры заторможенного потока газа. Число M и λ для оценки движения газовых потоков. Газодинамические функции и их использование в термодинамических расчетах авиационных двигателей.

Литература: [1,2,3,4]

Раздел 6. Течение в соплах и диффузорах. 2 часа

Тема 6.1. Течение в соплах и диффузорах

Уравнение обращения воздействий в газовых потоках и его использование для конструирования конфузоров и диффузоров. Особенности течения сверхзвуковых потоков в соплах и диффузорах.

Литература: [1,2,3]

Раздел 7. Краткая характеристика основных видов теплообмена и примеры их использования в авиационных двигателях. Закон Ньютона-Рихмана для расчета конвективного теплообмена. 2 часа

Тема 7.1. Краткая характеристика основных видов теплообмена и примеры их использования в авиационных двигателях. Закон Ньютона-Рихмана для расчета конвективного теплообмена

Основные виды теплообмена и их краткая характеристика. Основные понятия теплообмена. Градиент температуры и его представление в различных системах координат. Закон Фурье для оценки теплопроводности. Закон Ньютона-Рихмана для расчета конвективного теплообмена.

Литература: [1,2,3]

Раздел 8. Основной закон теплопроводности и его использование в расчетах тепловых потоков в твердых и газообразных телах различной конфигурации. 2 часа

Тема 8.1. Основной закон теплопроводности и его использование в расчетах тепловых потоков в твердых и газообразных телах различной конфигурации

Дифференциальное уравнение Фурье-Кирхгофа для теплопроводности. Частные случаи использования этого уравнения для описания тепловых потоков в твердых телах различной конфигурации.

Литература: [1,2,3]

Раздел 9. Система основных уравнений конвективного теплообмена при вынужденном и свободном движении теплоносителя. 2 часа

Тема 9.1. Система основных уравнений конвективного теплообмена при вынужденном и свободном движении теплоносителя

Уравнение движения Навье-Стокса для жидкости или газа. Уравнение сплошности. Уравнение переноса тепла. Краевые условия.

Система дифференциальных уравнений для описания вязкой жидкости при вынужденном движении теплоносителя в каналах.

Система дифференциальных уравнений для описания вязкой жидкости при свободном (естественном) движении теплоносителя в каналах.

Литература: [1,2,3]

Раздел 10. Основы теории подобия. Приведение уравнений конвективного теплообмена к безразмерному виду. 2 часа

Тема 10.1. Основы теории подобия. Приведение уравнений конвективного теплообмена к безразмерному виду

Геометрическое, кинематическое, тепловое подобие. Первая, вторая и третья теоремы теории подобия. Константы подобия.

Система уравнений конвективного теплообмена с константами подобия для вынужденного и свободного движения теплоносителя. Литература: [1,2,3]

Раздел 11. Критерии подобия и их физический смысл. 2 часа

Тема 11.1. Критерии подобия и их физический смысл

Критерии подобия и их физический смысл. Критериальные уравнения. Литература: [1,2,3]

Раздел 12. Критериальные уравнения и их практическое использование для расчета конвективного теплообмена. 2 часа

Тема 12.1. Критериальные уравнения и их практическое использование для расчета конвективного теплообмена

Критериальные уравнения при описании конвективного теплообмена: при обтекании пластины; при течении в трубе; при обтекании одиночной трубы и пучка труб; при изменении агрегатного состояния вещества; при больших скоростях движения.

Литература: [1,2,3]

Раздел 13. Тепловое излучение. Закон Кирхгофа теплового излучения. Особенности расчета теплового излучения в камерах сгорания тепловых двигателей. 2 часа

Тема 13.1. Тепловое излучение. Закон Кирхгофа теплового излучения. Особенности расчета теплового излучения в камерах сгорания тепловых двигателей

Краткая характеристика теплового излучения. Законы Планка, Вина, Стефана-Больцмана, Ламберта и Кирхгофа для описания теплового излучения.

Теплообмен излучением между газом и твердой стенкой на примере работы камеры сгорания авиационного ГТД.

Литература: [1,2,3]

Раздел 14. Сложный теплообмен (теплопередача). Интенсификация процессов теплопередачи. Теплообменные аппараты и их применение в авиационной и космической технике. 4 часа

Тема 14.1. Сложный теплообмен (теплопередача). Интенсификация процессов теплопередачи. Теплообменные аппараты и их применение в авиационной и космической технике

Теплопередача от горячего к холодному теплоносителю через:
- твердую стенку; - цилиндрическую поверхность; сферическую стенку. Интенсификация теплопередачи.

Понятие о тепловой изоляции. Критический размер изоляции.

Теплообменные аппараты. Расчет теплопередачи в теплообменных аппаратах систем кондиционирования воздушных судов и в авиационных двигателях. Литература: [1,2,3]

2.2. Перечень лабораторных занятий, и их объём в часах

ЛБ-1 Определение теплоёмкости воздуха. 4 часа

Литература: [6]

ЛБ-2 Исследование газовых процессов в элементах ТРД. 4 часа

Литература: [6]

ЛБ-3 Исследование циклов тепловых машин. 4 часа.

Литература: [6]

ЛБ-4 Новые циклы авиадвигателей. 4 часа

Литература: [6]

ЛБ-5 Исследование сопла с трением и подогревом. 4 часа

Литература: [6]

ЛБ-6 Определение коэффициента теплопроводности латунного стержня. 4 часа

Литература: [6]

ЛБ-7 Определение коэффициента теплоотдачи в условиях естественной конвекции. 4 часа

Литература: [6]

2.3. Тематика контрольного домашнего задания.

Исследование авиационного ГТД с регенерацией тепла.

Задача имеет комплексный характер. Знания и умения приобретаются при расчете и анализе:

- адиабатных процессов сжатия воздуха в компрессоре и расширения его в турбине ГТД;
- изобарных процессов подвода теплоты в камере сгорания ГТД и в теплообменном аппарате (по воздушной стороне);
- изобарных процессов охлаждения выхлопных газов в атмосфере и в теплообменном аппарате (по газовой стороне);
- энергетических показателей цикла Брайтона и его эффективности;
- влияния степени регенерации на экономию топлива;
- критериев Рейнольдса, Нуссельта и критериального уравнения конвективного теплообмена;
- коэффициентов теплоотдачи и теплопередачи в теплообменном аппарате;
- потребной площади теплообмена и габаритов теплообменного аппарата.

Литература: [7]

3. Рекомендуемая литература.

№ п/п	Автор	Наименование, издательство, год издания
1.	Шулекин В.Т.	Основная литература: Теплотехника. Ч.1 Тексты лекций. – М.:МГТУГА, 2007. 148с.
2.	Шулекин В.Т.	Гидрогазодинамика и тепломассообмен. Ч.2. Конспекты лекций. – М.?МГТУГА, 2002. 112с.
3.		Теория тепломассообмена: Учебник для технических университетов и вузов /С.И.Исаев, И.А.Кожин, В.И.Кофанов и др.; Под ред. А.И.Леонтьева. – 2-е изд. испр. и доп. М.:Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана,1997. 683с.
4.		Основы теплопередачи в авиационной и ракетно-космической технике: Учебник для авиационных специальностей вузов/В.С.Авдуевский, Б.М.Галицейский, Г.А.Глебов и др.; Под общ. ред. В.С.Авдуевского, В.К.Кошкина. 2-е изд., перераб. и доп. М.:Машиностроение,1992. 528с.
5.	Шулекин В.Т.	Основы теории и конструирования авиационных двигателей. М.:МГТУГА, 1994. 140с.
		Учебно-методическая литература:
6.	Шулекин В.Т. Медведев В.В. Тихонов Н.Д. Дворниченко В.В.	а) для лабораторных работ Лабораторный практикум по дисциплине «Термодинамика, теплопередача» для студентов специальности 160901 дневной и заочной форм обучения. - М.:МГТУГА,2007. 64с.
7.	Шулекин В.Т.	б) для изучения дисциплины и выполнения контрольной работы Пособие к изучению дисциплины и выполнению контрольной работы для студентов 3 курса специальности 130300 всех форм обучения. М.:МГТУГА, 2003. 28 с.

4. Рекомендуемые программные средства и компьютерные системы обучения и контроля знаний студентов.

Программа расчёта циклов тепловых установок с регенерацией тепла на ПЭВМ.

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по УМР
_____ Криницин В.В.
«___» _____ 2007г.

РАБОЧАЯ УЧЕБНАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

«Термодинамика и теплопередача», СД.04
(наименование, шифр по ГОС)
(Рабочий учебный план 2007 г.)

Специальность **160901 Техническая эксплуатация летательных
аппаратов и двигателей**
(шифр по ГОС)

Факультет - **Механический**
Кафедра - **Двигатели летательных аппаратов**
Курс - **3** Форма обучения - **заочная** Семестр **5**

Общий объем учебных часов на дисциплину - **110** (ч.)
Объем аудиторных часов - **12** (ч.) , в том числе:
Лекции - **4** (ч.)
Лабораторные занятия - **8** (ч.)
Самостоятельная работа - **98** (ч.)
Контрольная работа - **3 курс (семестр – 5-й)**
Зачет - **3 курс (семестр – 5-й)**

Москва – 2007

Рабочая учебная программа составлена на основании примерной учебной программы дисциплины и в соответствии с государственными требованиями к минимуму содержания и уровню подготовки выпускника по специальности.

Рабочую учебную программу составил:

Шулекин В.Т., доцент, к.т.н.
(Ф.И.О., звание, степень) (подпись)

Рабочая учебная программа утверждена на заседании кафедры, протокол № ___ от «___» _____ 2007г.

Заведующий кафедрой Никонов В.В., проф., д.т.н.
(Ф.И.О., звание, степень) (подпись)

Рабочая учебная программа одобрена методическим советом специальности 160901 Техническая эксплуатация летательных аппаратов и двигателей
(наименование специальности)

«___» _____ 2007 г. протокол № ___.

Председатель методического совета Чинючин Ю.М., проф., д.т.н.
(Ф.И.О., звание, степень)

(подпись)

Рабочая учебная программа согласована с Учебно-методическим управлением (УМУ)
Начальник УМУ Логачев В.П., доц., к.т.н.
(Ф.И.О., звание, степень) (подпись)

«Согласовано»
Декан заочного факультета Ермаков А.Л., проф., к.т.н.
(Ф.И.О.) (подпись)

1. Цели и задачи дисциплины

1.1. Цель преподавания дисциплины

Цель преподавания дисциплины «Термодинамика и теплопередача» состоит в изучении:

- термодинамических процессов, составляющих циклы современных и перспективных тепловых машин;
- основных закономерностей преобразования теплоты в работу в тепловых машинах;
- основных законов энергообмена в газовых потоках;
- основных законов теплопроводности, конвективного теплообмена, теплового излучения и сложного теплообмена (теплопередачи).

1.2. Задачи изучения дисциплины (необходимый комплекс знаний и умений).

1.2.1. Иметь представление о проблемах технической термодинамики и теплообмена в авиационных газотурбинных двигателях гражданской авиации и обеспечении летной годности воздушных судов и их силовых установок в процессе эксплуатации.

1.2.2. Знать:

- термодинамические процессы, составляющие циклы тепловых машин;
- основные законы преобразования теплоты в работу в авиационных двигателях;
- современные методы анализа эффективности циклов тепловых машин;
- принципы работы авиадвигателей;
- особенности теплообмена в авиационных двигателях;
- методы поиска и устранения неисправностей авиадвигателей на основе анализа их работы как тепловых машин.

1.2.3. Уметь:

- производить анализ эффективности термодинамических процессов, в которых осуществляется преобразование теплоты в работу;
- осуществлять анализ безопасной работы и оценки эффективности циклов тепловых установок;
- производить расчеты различных видов теплообмена при взаимодействии рабочего тела с конструкцией авиационных двигателей.

1.2.4. Иметь навыки:

- в определении параметров состояния рабочего тела в контрольных точках циклов авиационных двигателей;
- в оценке эффективных различных циклов тепловых установок;
- в определении основных параметров теплообмена при регенерации тепла в силовых установках летательных аппаратов.

2. Содержание дисциплины

2.1. Наименование разделов (подразделов) , объём часах.
Содержание лекций, ссылки на литературу:

а) в период зачетно-экзаменационной сессии

Раздел 1. Циклы тепловых двигателей. Цикл Брайтона и его применение в ГТД. Цикл Гемфри, его применение в авиационной и космической технике. 2 часа

Тема 1.1. Циклы тепловых двигателей

Цикл Н.Л.С. Карно (1824г.) – базовый цикл для тепловых двигателей. Энергетические показатели цикла Карно. Термический КПД цикла Карно.

Циклы Н.А. Отто (1876г.), Р. Дизеля (1897г.) и их применение в поршневых двигателях внутреннего сгорания. Энергетические показатели циклов Отто и Дизеля. Оценка эффективности термодинамического совершенства циклов Отто и Дизеля.

Литература: [1,2,3,4]

Тема 1.2. Циклы газотурбинных двигателей

Цикл Брайтона газотурбинных двигателей, обеспечивший качественный скачок в развитии авиации. Энергетические показатели цикла Брайтона и оценка его термодинамического совершенства.

Цикл Гемфри газотурбинной установки с подводом теплоты при $v=const$. Энергетические показатели цикла Гемфри и оценка его термодинамического совершенства.

Регенеративные циклы. Оценка термодинамического совершенства регенеративных циклов авиационных ГТД.

Литература: [1,2,3,4]

Раздел 2. Краткая характеристика основных видов теплообмена и примеры их использования в авиационных двигателях. Закон Ньютона-Рихмана для расчета конвективного теплообмена. 2 часа

Тема 2.1. Краткая характеристика основных видов теплообмена и примеры их использования в авиационных двигателях. Закон Ньютона-Рихмана для расчета конвективного теплообмена

Основные виды теплообмена и их краткая характеристика. Основные понятия теплообмена. Градиент температуры и его представление в различных системах координат. Закон Фурье для оценки теплопроводности. Закон Ньютона-Рихмана для расчета конвективного теплообмена.

Литература: [1,2,3]

б) самостоятельная работа студента**Раздел 1 . Уравнение состояния, виды уравнения состояния. Реальный и идеальный газ****Тема 1.1. Уравнение состояния реальных и идеальных газов**

Предмет курса термодинамики и теплопередачи. Значение курса в подготовке инженера-механика по технической эксплуатации летательных аппаратов и авиационных двигателей в обеспечении безопасности полетов летательных аппаратов гражданской авиации. Краткий исторический очерк. Роль отечественных учёных в развитии данной науки.

Краткая характеристика идеального и реального газа. Газовая постоянная для идеального газа и её роль при оценке эффективности использования отработавших ресурс авиадвигателей в других отраслях промышленности.

Уравнение состояния идеального газа в дифференциальной и интегральной формах. Понятие о деформационной и технической работах при взаимодействии рабочего тела с внешней средой. Уравнение состояния для реального газа.

Литература: [1,2,3,4]

Контрольные вопросы

1. Что такое термодинамическая система? Приведите примеры различных рабочих тел, используемых в тепловых и холодильных машинах [1].
2. Давление газа 750 мм рт.ст. Выразите это давление в следующих единицах: кгс/см²; Па; атм; бар; мм вод.ст. [1].
3. Температура газа равна 600°С. Выразите эту температуру по шкале Кельвина, Фаренгейта, Реомюра, Ренкина [1].
4. Во сколько раз требуется больше энергии при сжатии водорода по сравнению с воздухом (при прочих равных условиях)? [1].
5. Определить плотность воздуха при стандартных атмосферных условиях, пользуясь уравнением состояния для идеальных газов [1].

Раздел 2. Теплоёмкость. Виды теплоёмкости. Теплоёмкость смеси газов.**Тема 2.1. Теплоёмкость рабочего тела авиационных двигателей**

Определение теплоёмкости рабочего тела. Понятие об удельной массовой, объёмной, мольной и других видах теплоёмкости и их практическое использование в авиационной и космической технике.

Зависимость теплоёмкости от температуры рабочего тела. Теплоёмкость смеси газов.

Литература: [1,2,3,4]

Контрольные вопросы

1. Изобразите и поясните зависимость теплоёмкости от показателя политропы.
2. Напишите и поясните уравнение Майера.

Раздел 3. Основные термодинамические законы**Тема 3.1. Основные термодинамические процессы в авиадвигателях**

Первый и второй законы термодинамики. Изохорный, изобарный, изотермический, адиабатный и политропный процессы и примеры их использования в авиационной и космической технике. Энергетические показатели политропного процесса Особенности преобразования теплоты в работу в названных процессах.

Литература: [1,2,3,4]

Контрольные вопросы

1. Проанализируйте формулу Джоуля для изменения внутренней энергии. Зависит ли изменение внутренней энергии тела от температуры?
2. Проанализируйте уравнение первого закона термодинамики в дифференциальной и интегральной формах.

Раздел 4. Уравнения движения газового потока. Газовая динамика сверхзвуковых газовых течений**Тема 4.1. Уравнения движения газового потока**

Система основных уравнений движения для потока газа. Уравнение неразрывности. Уравнение сохранения энергии. Уравнение Бернулли. Уравнения Эйлера о количестве движения и о моменте количества движения.

Параметры заторможенного потока газа. Число M и λ для оценки движения газовых потоков. Газодинамические функции и их использование в термодинамических расчетах авиационных двигателей.

Литература: [1,2,3,4]

Контрольные вопросы

1. Напишите уравнение расхода. Почему при резком увеличении температуры расход газа в сечении уменьшается?
2. Напишите уравнение сохранения энергии для входа в компрессор, на выходе из компрессора .
3. Напишите уравнение Бернулли для несжимаемого потока.
4. Напишите уравнение Бернулли в интегральной и дифференциальной формах.
5. Напишите формулы для критических параметров газа.
6. Соотношения для M и λ .

Раздел 5. Течение в соплах и диффузорах

Тема 5.1. Течение в соплах и диффузорах

Уравнение обращения воздействий в газовых потоках и его использование для конструирования конфузоров и диффузоров. Особенности течения сверхзвуковых потоков в соплах и диффузорах.

Литература: [1,2,3]

Контрольные вопросы

1. Изобразите графики газодинамических функций температуры, давления, плотности и относительной плотности тока от приведенной скорости.
2. Напишите уравнение обращения воздействий. Выполните анализ этого уравнения.

Раздел 6. Основной закон теплопроводности и его использование в расчетах тепловых потоков в твердых и газообразных телах различной конфигурации

Тема 6.1. Основной закон теплопроводности и его использование в расчетах тепловых потоков в твердых и газообразных телах различной конфигурации

Дифференциальное уравнение Фурье-Кирхгофа для теплопроводности. Частные случаи использования этого уравнения для описания тепловых потоков в твердых телах различной конфигурации.

Литература: [1,2,3]

Контрольные вопросы

1. Поясните содержание понятий: температурное поле, температурный градиент, тепловой поток.
2. Что называют коэффициентом теплопроводности и от каких факторов он зависит?.
3. Напишите и поясните формулы теплопроводности через плоскую, цилиндрическую и сферическую стенки .
4. Изобразите и поясните график изменения температуры через плоскую, цилиндрическую и сферическую стенки.

Раздел 7. Система основных уравнений конвективного теплообмена при вынужденном и свободном движении теплоносителя

Тема 7.1. Система основных уравнений конвективного теплообмена при вынужденном и свободном движении теплоносителя

Уравнение движения Навье-Стокса для жидкости или газа. Уравнение сплошности. Уравнение переноса тепла. Краевые условия.

Система дифференциальных уравнений для описания вязкой жидкости при вынужденном движении теплоносителя в каналах.

Система дифференциальных уравнений для описания вязкой жидкости при свободном (естественном) движении теплоносителя в каналах.

Литература: [1,2,3]

Контрольные вопросы

1. Поясните механизм переноса теплоты при конвективном теплообмене.
2. Напишите и поясните уравнение Ньютона-Рихмана для конвективного теплообмена.
3. Перечислите факторы, от которых зависит коэффициент теплоотдачи.
5. Способы интенсификации конвективного теплообмена.

Раздел 8. Основы теории подобия. Приведение уравнений конвективного теплообмена к безразмерному виду

Тема 8.1. Основы теории подобия. Приведение уравнений конвективного теплообмена к безразмерному виду

Геометрическое, кинематическое, тепловое подобие. Первая, вторая и третья теоремы теории подобия. Константы подобия.

Система уравнений конвективного теплообмена с константами подобия для вынужденного и свободного движения теплоносителя.

Критерии подобия и их физический смысл. Критериальные уравнения.
Литература: [1,2,3]

Контрольные вопросы

1. Напишите и поясните критерия подобия, отражающие: режим течения теплоносителя; характер движения теплоносителя; конвективный теплообмен; теплопроводность.

Раздел 9. Критериальные уравнения и их практическое использование для расчета конвективного теплообмена

Тема 9.1. Критериальные уравнения и их практическое использование для расчета конвективного теплообмена

Критериальные уравнения при описании конвективного теплообмена: при обтекании пластины; при течении в трубе; при обтекании одиночной трубы и пучка труб; при изменении агрегатного состояния вещества; при больших скоростях движения.

Литература: [1,2,3]

Контрольные вопросы.

1. Что называют коэффициентом восстановления температуры и какова его зависимость от режима течения газа?

2. Каков характер температурного поля в слоях газа, прилегающих к стенке, при теплоотдаче в условиях большой скорости течения теплоносителя? .

Раздел 10. Тепловое излучение. Закон Кирхгофа теплового излучения. Особенности расчета теплового излучения в камерах сгорания тепловых двигателей

Тема 10.1. Тепловое излучение. Закон Кирхгофа теплового излучения. Особенности расчета теплового излучения в камерах сгорания тепловых двигателей

Краткая характеристика теплового излучения. Законы Планка, Вина, Стефана-Больцмана, Ламберта и Кирхгофа для описания теплового излучения.

Теплообмен излучением между газом и твердой стенкой на примере работы камеры сгорания авиационного ГТД.

Литература: [1,2,3]

Контрольные вопросы

1. Каковы физические основы лучистого теплообмена? Напишите уравнение и дайте формулировку закона Стефана-Больцмана для теплового излучения газов.
2. Изложите суть закона Кирхгофа.
3. В чём отличие газового излучения от твёрдых тел?

Раздел 11. Сложный теплообмен (теплопередача). Интенсификация процессов теплопередачи. Теплообменные аппараты и их применение в авиационной и космической технике

Тема 11.1. Сложный теплообмен (теплопередача). Интенсификация процессов теплопередачи. Теплообменные аппараты и их применение в авиационной и космической технике

Теплопередача от горячего к холодному теплоносителю через:
- твердую стенку; - цилиндрическую поверхность; сферическую стенку.
Интенсификация теплопередачи.

Понятие о тепловой изоляции. Критический размер изоляции.

Теплообменные аппараты. Расчет теплопередачи в теплообменных аппаратах систем кондиционирования воздушных судов и в авиационных двигателях. Литература: [1,2,3]

Контрольные вопросы

1. Перечислите существующие типы теплообменных аппаратов [2].
2. Что такое среднелогарифмическая разность температур? [2].
3. Поясните работу теплообменных аппаратов, работающих по схеме прямотока, противотока и перекрёстного тока [2].

2.2. Перечень лабораторных занятий, и их объём в часах (выполняется в период лабораторно-экзаменационной сессии)

ЛБ-1 Определение теплоёмкости воздуха. 4 часа

Литература: [5]

ЛБ-2 Определение коэффициента теплоотдачи в условиях естественной конвекции. 4 часа

Литература: [5]

2.3. Тематика контрольной работы.

Исследование авиационного ГТД с регенерацией тепла.

Задача имеет комплексный характер. Знания и умения приобретаются при расчете и анализе:

- адиабатных процессов сжатия воздуха в компрессоре и расширения его в турбине ГТД;
- изобарных процессов подвода теплоты в камере сгорания ГТД и в теплообменном аппарате (по воздушной стороне);
- изобарных процессов охлаждения выхлопных газов в атмосфере и в теплообменном аппарате (по газовой стороне);
- энергетических показателей цикла Брайтона и его эффективности;
- влияния степени регенерации на экономию топлива;
- критериев Рейнольдса, Нуссельта и критериального уравнения конвективного теплообмена;
- коэффициентов теплоотдачи и теплопередачи в теплообменном аппарате;
- потребной площади теплообмена и габаритов теплообменного аппарата.

Литература: [6]

3. Рекомендуемая литература.

№ п/п	Автор	Наименование, издательство, год издания
1.	Шулекин В.Т.	Основная литература: Теплотехника. Ч.1 Тексты лекций. – М.:МГТУГА, 2007. 148с.
2.	Шулекин В.Т.	Гидрогазодинамика и тепломассообмен. Ч.2. Конспекты лекций. – М.:МГТУГА, 2002. 112с.
3.		Теория тепломассообмена: Учебник для технических университетов и вузов /С.И.Исаев, И.А.Кожин, В.И.Кофанов и др.; Под ред. А.И.Леонтьева. – 2-е изд. испр. и доп. М.:Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 1997. 683с.
4.		Основы теплопередачи в авиационной и ракетно-космической технике: Учебник для авиационных специальностей вузов/В.С.Авдуевский, Б.М.Галицейский, Г.А.Глебов и др.; Под общ. ред. В.С.Авдуевского, В.К.Кошкина. 2-е изд., перераб. и доп. М.:Машиностроение, 1992. 528с.
5.	Шулекин В.Т. Медведев В.В. Тихонов Н.Д. Дворниченко В.В.	Учебно-методическая литература: а) для лабораторных работ Лабораторный практикум по дисциплине «Термодинамика, теплопередача» для студентов специальности 160901 дневной и заочной форм обучения. - М.:МГТУГА, 2007. 64с. б) для изучения дисциплины и выполнения контрольного домашнего задания
6.	Шулекин В.Т.	Методические указания к изучению дисциплины «Термодинамика и теплопередача» и выполнению контрольного задания для студентов 3 курса специальности 160901 заочного обучения». - М.:МГТУГА, 2007. 32 с.

Контрольные вопросы и задачи

по дисциплине «Термодинамика и теплопередача» учебного плана специальности 160901 «Техническая эксплуатация летательных аппаратов и двигателей» для студентов 3 курса Механического факультета

Раздел 1 . Уравнение состояния, виды уравнения состояния. Реальный и идеальный газ.

1. Поясните содержание понятий «Рабочее тело тепловых машин» и «Внешняя среда».

Задача. Определить газовую постоянную для следующих газов: CO_2 ; H_2 ; CH_4 .

2. Поясните содержание понятия «Параметры состояния рабочего тела».

Задача. Определить газовую постоянную смеси газов, состоящую из 78 % азота и 22 % кислорода.

3. Напишите и поясните уравнение состояния для идеального газа в дифференциальной и интегральной форме.

Задача. На весах стоят две одинаковые банки. В одной из них сухой воздух, в другой – влажный. Какая банка тяжелее?

4. Уравнение состояния реального газа.

Задача. Часть воздуха из баллона ёмкостью 40 литров, находящегося под давлением 150 МПа при температуре 20°С была использован для запуска двигателя. Определить массу использованного воздуха, если конечные параметры состояния равны $p=1$ МПа, $t=20^\circ\text{C}$.

Раздел 2. Теплоёмкость. Виды теплоёмкости. Теплоёмкость смеси газов.

5. Теплоёмкость рабочего тела (определение; виды теплоёмкостей; истинная и средняя теплоёмкость; зависимость теплоёмкости от процесса).

Задача. Определить среднюю теплоёмкость в интервале температур от 200°С до 600°С, если известна зависимость теплоёмкости от температуры

$$c_{pm} \int_0^t = 0.9952 + 0.9349 \cdot 10^{-4} \cdot t$$

6. Поясните содержание понятия «Внутренняя энергия рабочего тела». Формула Джоуля для расчета изменения внутренней энергии рабочего тела.

Задача. В баллоне объёмом 40 литров под давлением 150 МПа температура воздуха возросла с $t_1=20^\circ\text{C}$ до $t_2=40^\circ\text{C}$. Определить изменение внутренней энергии рабочего тела.

Раздел 3. Основные термодинамические законы.

7. Поясните содержание понятий «Работа деформационная» и «Работа техническая».

Задача. Определить деформационную и техническую работы для 1 кг сухого воздуха в политропном процессе, если известны: $p_1=740$ мм рт.ст., $t_1=20^\circ\text{C}$, $p_2=1$ Мпа, $n=1.5$.

8. Напишите и поясните уравнение первого закона в дифференциальной и интегральной формах.

Задача. В результате подвода 100 кДж тепла удельная внутренняя энергия возросла на 75 кДж/кг. Зная, что количество сухого воздуха равно 2 кг, определить работу деформации.

9. Поясните содержание понятий «Теплота рабочего тела» и «Энтальпия рабочего тела».

Задача. В результате подвода 100 кДж тепла удельная энтальпия возросла на 75 кДж/кг. Зная, что количество сухого воздуха равно 2 кг, определить техническую работу.

10. Вывод уравнения политропного процесса.

Задача. Изобразите и поясните график изменения теплоёмкости процесса от показателя политропы.

11. Изобарный процесс (формула процесса; связь между параметрами состояния в процессе; примеры использования процесса; преобразование энергий в процессе). Изобразите и поясните изобарный процесс в p - v и T - S координатах.

Задача. Определить количество тепла, подведенное к 1 кг сухого воздуха в камере горения газотурбинного двигателя, если известны: $T_1=600$ К, $T_2=1600$ К.

Принять $c_p=1.28$ кДж/(кг.К).

12. Изотермический процесс (формула процесса; связь между параметрами состояния в процессе; примеры использования процесса; преобразование энергий в процессе). Изобразите и поясните изотермический процесс в p - v и T - S координатах.

Задача. Определить удельную техническую работу сжатия для сухого воздуха в изотермическом процессе сжатия, если известны: $p_1=760$ мм рт. ст., $t_1=20^\circ\text{C}$, $p_2=1$ Мпа.

13. Поясните содержания понятия «Энтропия рабочего тела».

Задача. Определить изменение удельной энтропии в изобарном процессе, если известны: $T_1=600$ К, $T_2=1600$ К. Принять $c_p=1.28$ кДж/(кг.К).

14. Изохорный процесс (формула процесса; связь между параметрами состояния в процессе; примеры использования процесса; преобразование энергий в процессе). Изобразите и поясните изохорный процесс в p - v и T - S координатах.

Задача. Определить давление и температуру при подводе 1000 кДж/кг тепла к воздуху в камере сгорания поршневого двигателя внутреннего сгорания, если известны: $p_1=1$ МПа, $T_1=450$ К.

15. Адиабатный процесс (формула процесса; связь между параметрами состояния в процессе; примеры использования процесса; преобразование энергий в процессе). Изобразите и поясните адиабатный процесс в p - v и T - S координатах.

Задача. Определить адиабатную работу сжатия воздуха в компрессоре газотурбинного двигателя, если известны: $p_1=760$ мм рт.ст., $T_1=288$ К, $\pi=p_2/p_1=20$.

Раздел 4. Циклы тепловых двигателей. Цикл Брайтона и его применение в ГТД. Цикл Гемфри, его применение в авиационной и космической технике.

16. Цикл С.Карно (изображение цикла в p - v и T - S координатах; работа сжатия и расширения в цикле; количество тепла, подведенное и отведенное от рабочего тела в цикле; работа цикла; полезно использованное тепло в цикле).

Задача. Определить работу цикла и термический КПД цикла С.Карно, если известны: $T_1=288$ К, $T_2=1500$ К.

17. Сущность второго закона термодинамики. Поясните, почему цикл С.Карно является базовым для всех остальных циклов тепловых машин.

Задача. Определить степень повышения давления воздуха в цикле С.Карно, если известны: $T_1=288$ К, $T_2=1500$ К.

18. Цикл Н.А.Отто (изображение в p - v и T - S координатах; параметры цикла; работа сжатия и расширения в цикле; количество тепла, подведенное и отведенное от рабочего тела в цикле; работа цикла; полезно использованное тепло в цикле).

Задача. Проверить, соответствует ли степень сжатия в поршневом двигателе внутреннего сгорания $\varepsilon=10$ техническим условиям, если по результатам измерений адиабатного сжатия получена степень повышения давления воздуха $\pi=p_2/p_1=25$.

19. Цикл Р.Дизеля (изображение в p - v и T - S координатах; параметры цикла; работа сжатия и расширения в цикле; количество тепла, подведенное и отведенное от рабочего тела в цикле; работа цикла; полезно использованное тепло в цикле).

Задача. Поясните, почему в цикле Отто имеет место ограничение по степени сжатия, а в цикле Дизеля это ограничение отсутствует?

20. Цикл Брайтона (изображение в p - v и T - S координатах; параметры цикла; работа сжатия и расширения в цикле; количество тепла, подведенное и отведенное от рабочего тела в цикле; работа цикла; полезно использованное тепло в цикле).

Задача. Определить работу цикла и термический КПД цикла Брайтона, если известны: $T_1=288$ К, $\pi=p_2/p_1=25$, $\Delta=T_3/T_1=5$.

21. Анализ термодинамического совершенства циклов Отто, Дизеля и Брайтона при заданных параметрах циклов $\pi=25$; $\Delta=5$; $T_1=288$ К.

Задача. Изобразите и поясните циклы Отто, Дизеля и Брайтона в p - v и T - S координатах при одинаковых параметрах цикла ($\pi=idem$; $\Delta=idem$; $T_1=idem$).

22. Понятие об утилизации (регенерации) тепла в циклах Отто, Дизеля и Брайтона. Термический КПД тепловых машин с утилизацией тепла.

Задача. Определить термический КПД цикла Отто без учета утилизации тепла и при наличии утилизатора, если известны: $\pi=25$; $\Delta=5$; $T_1=288$ К.

23. Цикл Брайтона с регенерацией тепла (изображение цикла в p - v и T - S координатах; понятие о степени регенерации). Работа цикла и термический КПД цикла Брайтона с регенерацией тепла.

Задача. Определить работу цикла и термический КПД цикла Брайтона с регенерацией тепла, если известны: $\pi=10$; $\Delta=5$; $T_1=288$ К; $\sigma_p=0.7$.

Раздел 5. Уравнения движения газового потока. Газовая динамика сверхзвуковых газовых течений.

24. Напишите и поясните уравнение неразрывности, примеры его использования.

Задача. Как изменится расход воздуха через двигатель, если на его вход поступают:

- посторонние предметы;
- горячие газы от других двигателей?

25. Напишите и поясните уравнение сохранения энергии, примеры его использования.

Задача. Определить температуру заторможенного потока воздуха в полете ВС с числом $M=2.5$, если известна температура атмосферного воздуха $T_{\text{н}}=216$ К.

26. Параметры заторможенного потока. Приборы для измерения параметров заторможенного потока газа.

Задача. Определить температуру заторможенного потока воздуха, если по результатам измерений известны: $p^*=760$ мм рт.ст., $p=740$ мм рт.ст., $T_{\text{изм}}^*=280$ К, $r=0.98$.

27. Напишите и поясните уравнение первого закона термодинамики для газового потока.

Задача. Определить режим течения потока воздуха, если по результатам измерений известны: $p^*=800$ мм рт.ст., $p=700$ мм рт.ст.,

28. Напишите и поясните обобщенное уравнение Бернулли, примеры его использования.

Задача. Определить скорость истечения газа из сопла турбореактивного двигателя, если известны: $p_c=10^5$ Па, $p_c^*=2*10^5$ Па, $T_c^*=900$ К.

29. Напишите и поясните уравнение Эйлера о количестве движения, примеры его использования.

Задача. Определить силу реакции струи, вытекающей из сопла турбореактивного двигателя, если известны: $p_c=10^5$ Па, $p_c^*=2*10^5$ Па, $F_c=1$ м².

30. Приведите и поясните уравнение Эйлера о моменте количества движения и примеры его использования.

Задача. Определить работу на окружности рабочего колеса турбомашин, если известны: $u=300$ м/с, $w_{1u}=300$ м/с, $w_{2u}=250$ м/с.

31. Приведите и поясните уравнения обращения воздействий, примеры его использования.

Задача. Изобразите и поясните формы каналов для ускорения и торможения дозвукового и сверхзвукового потока газа. Приведите примеры использования таких каналов.

Раздел 6. Течение в соплах и диффузорах.

32. Приведите и поясните схемы диффузоров и сопел, примеры их использования.

Задача. Изобразите и поясните графики изменения параметров состояния рабочего тела во входном и выходном устройствах газотурбинного двигателя.

Раздел 7. Краткая характеристика основных видов теплообмена и примеры их использования в авиационных двигателях. Закон Ньютона-Рихмана для расчета конвективного теплообмена.

33. Приведите и поясните виды теплообмена в рабочих лопатках турбины газотурбинного двигателя.

Задача. Определить количество теплоты, передаваемой горячим газом, к поверхности турбинной лопатки, если известны:

$$\alpha = 860 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}, F_{\text{л}} = 100 \text{ см}^2, \text{ разность температур газа}$$

и поверхности лопатка равна 650 К.

Раздел 8. Основной закон теплопроводности и его использование в расчетах тепловых потоков в твердых и газообразных телах различной конфигурации.

34. Напишите и поясните основной закон теплопроводности.

Задача. Определить потерю теплоты через кирпичную стенку длиной 5 м, высотой 3 и толщиной 250 мм, если на поверхностях стенки поддерживаются температуры $t_{\text{сr1}}=20^\circ\text{C}$ и $t_{\text{сr2}}= - 30^\circ\text{C}$. Коэффициент теплопроводности кирпича $\lambda=0.5 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$.

Раздел 9. Система основных уравнений конвективного теплообмена при вынужденном и свободном движении теплоносителя.

35. Напишите и поясните уравнение движения Навье-Стокса в проекции на ось x .

Задача. Плоская пластина длиной $l=2.5$ м омывается потоком воздуха со скоростью 2 м/с при температуре $t_{ж}=20^{\circ}\text{C}$. Определить характер пограничного слоя и его толщину δ на расстоянии от передней кромки пластины $\bar{x} = 0.2$, а также коэффициент теплоотдачи в этом сечении, если известны следующие теплофизические свойства теплоносителя: $\nu=15.06 \cdot 10^{-6}$ м²/с, $\lambda=2.593 \cdot 10^{-2} \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$, $Pr=0.703$.

Раздел 10. Основы теории подобия. Приведение уравнений конвективного теплообмена к безразмерному виду

36. Основные понятия теории подобия (геометрическое, кинематическое, тепловое подобие). Сформулируйте три основные теоремы подобия.

Задача. Для отопления испытательного бокса используют трубу, в которой протекает горячая вода. Рассчитать коэффициент теплоотдачи и конвективный тепловой поток, если известны: размеры трубы $d_{н}=0.1$, $l=10$ м; температура стенки трубы $t_{ст}=85^{\circ}\text{C}$ и воздуха $t_{ж}=20^{\circ}\text{C}$; теплофизические свойства воздуха при определяющей температуре $\lambda=2.84 \cdot 10^{-2}$ Вт/(м.К), $\nu=18.2 \cdot 10^{-6}$ м²/с, $Pr=0.697$.

Раздел 11. Критерии подобия и их физический смысл.

37. Напишите соотношения для критериев подобия Re , Nu , Fo , Eu и поясните их физический смысл.

Раздел 12. Критериальные уравнения и их практическое использование для расчета конвективного теплообмена

Задача. Определить среднее значение коэффициента теплоотдачи и количество передаваемой теплоты при течении воды в горизонтальной трубе диаметром $d=3$ мм и длиной $l=0.5$ м, если скорость воды $c=0.3$ м/с, средняя по длине температура воды $t_{ж}=60^{\circ}\text{C}$ (теплофизические свойства воды: $\lambda_{ж}=0.659$ Вт/(м.К), $\nu_{ж}=0.478 \cdot 10^{-6}$ м²/с, $Pr_{ж}=2.98$), средняя температура стенки $t_{ст}=20^{\circ}\text{C}$ ($Pr_{ст}=7.02$).

Раздел 13. Тепловое излучение. Закон Кирхгофа теплового излучения. Особенности расчета теплового излучения в камерах сгорания тепловых двигателей.

38. Тепловое излучение и его основные законы.

Задача. Определить потерю теплоты путем излучения с поверхности стальной трубы диаметром $d=70$ мм и длиной $l=3$ м при температуре поверхности $t_1=227^{\circ}\text{C}$, если эта труба находится: а) в большом кирпичном помещении, температура стенок которого $t_2=27^{\circ}\text{C}$; б) в кирпичном канале, площадь которого равна 0.3×0.3 м при температуре стенок $t_2=27^{\circ}\text{C}$. Принять степень черноты для окисленной стали $\epsilon_1=0.79$, для кирпича $\epsilon_2=0.78$

Раздел 14. Сложный теплообмен (теплопередача). Интенсификация процессов теплопередачи. Теплообменные аппараты и их применение в авиационной и космической технике.

39. Мероприятия по интенсификации теплопередачи.

Задача. Определить плотность теплового потока через стенку, холодная сторона которой ребрена и коэффициент ребрения $F_2/F_1=13$. Толщина стенки $\delta=10$ мм и коэффициент теплопроводности материала $\lambda=40$ Вт/(м·К). Коэффициенты теплоотдачи соответственно $\alpha_1=200$ и $\alpha_2=10$ Вт/(м²·К) и температуры $t_{ж1}=75^\circ\text{C}$ и $t_{ж2}=15^\circ\text{C}$.

40. Задача. Определить температуру воздуха на выходе из теплообменного аппарата ГТД, если известны: температура воздуха на входе в этот аппарат $T_k=556$ К, температура газа на входе в теплообменный аппарат $T_r=699$ К и степень регенерации $\sigma_{рег}=0.7$.

Пример чтения лекции

Лекция № 1

Раздел 1 . Уравнение состояния, виды уравнения состояния. Реальный и идеальный газ. 2 часа

Тема 1.1. Уравнение состояния реальных и идеальных газов

Предмет курса термодинамики и теплопередачи. Значение курса в подготовке инженера-механика по технической эксплуатации летательных аппаратов и авиационных двигателей в обеспечении безопасности полетов летательных аппаратов гражданской авиации. Краткий исторический очерк. Роль отечественных учёных в развитии данной науки.

Краткая характеристика идеального и реального газа. Газовая постоянная для идеального газа и её роль при оценке эффективности использования отработавших ресурс авиадвигателей в других отраслях промышленности.

Уравнение состояния идеального газа в дифференциальной и интегральной формах. Понятие о деформационной и технической работах при взаимодействии рабочего тела с внешней средой. Уравнение состояния для реального газа.

Литература: [1,2,3,4]

Термодинамика – наука о закономерностях превращения теплоты.
Теплопередача – наука, изучающая процессы переноса тепла в пространстве с неоднородным температурным полем.

На рис.1 (на экране в специализированной аудитории) приведена структура курса термодинамики и теплопередачи, для изучения которой требуются базовые учебные дисциплины: **физика; химия; высшая математика**. В свою очередь, термодинамика и теплопередача сама является базовой для следующих учебных дисциплин: **теория авиационных двигателей; конструкция и прочность авиадвигателей; техническая эксплуатация ЛА и АД; безопасность полётов; производство и ремонт ЛА и АД; экономика гражданской авиации**.

Рис.1. Значение курса в подготовке инженера-механика по технической эксплуатации летательных аппаратов и авиационных двигателей в обеспечении безопасности полетов летательных аппаратов гражданской авиации.

На рис.2 (на экране) приведена галерея ученых (**Авогадро Амадео** (1776 – 1856), итальянский физик и химик. В 1811 году открыл закон – **в равных объёмах разных идеальных газов, находящихся при одинаковых температурах и одинаковых давлениях, заключено равное число молекул или один киломоль любого идеального газа при**

нормальных условиях: давление 760 мм рт.ст. = 101325 Па, температура +15°C=273.15 К , занимает объём, равный 22,4136 м³ ; Джоуль Джеймс Прескотт (1818 – 1889) английский физик. В 1843 году открыл закон – внутренняя энергия идеального газа зависит только от температуры и не зависит от его плотности (объёма); Ломоносов Михаил Васильевич (1711-1765), первый русский ученый – естествоиспытатель = сформулировал принцип сохранения материи и движения; Майер Юлиус Роберт (1814 – 1878), немецкий естествоиспытатель, врач. Первым сформулировал закон сохранения энергии (эквивалентности механической работы и теплоты); Дальтон Джон (1766 – 1844). английский химик и физик. Первым определил атомные веса (массы) ряда элементов . В 1801 и 1803 годах открыл закон-сумма парциальных давлений составляющих смесь газов, равна общему давлению смеси; Амага (1841-1915) сформулировал закон: сумма парциальных объёмов составляющих смесь газов равна объёму все смеси; Томсон Уильям (1824-1907), английский физик. В 1892 году за научные заслуги получил титул барона Кельвина. Открыл второй закон термодинамики, предложил абсолютную шкалу температур; Отто Николаус Август (1832-1891), немецкий конструктор. В 1895 году создал 4-х тактный газовый двигатель внутреннего сгорания; Карно Никола Лазар Сади (1796-1832), французский физик и инженер, один из основателей термодинамики. Рассмотрел идеальный термодинамический цикл и доказал теорему, названную его именем; Дизель Рудольф ((1858-1913), немецкий инженер. В 1897 году создал двигатель внутреннего сгорания, названный его именем и др.) , которые открыли важнейшие законы термодинамики, позволившие создать совершенные тепловые двигатели, в том числе и для гражданской авиации

<p>Авогадро Амадео (1776 – 1856), итальянский физик и химик. В 1811 году открыл закон – при нормальных условиях: давление 760 мм рт.ст. = 101325 Па, температура +15°C=273.15 К , занимает объём, равный 22,4136 м³</p>	<p>Джоуль Джеймс Прескотт (1818 – 1889) английский физик. В 1843 году открыл закон – $\Delta u = c_v(T_2 - T_1)$</p>	<p>Михаил Васильевич (1711-1765), первый русский ученый – естествоиспытатель = сформулировал принцип сохранения материи и движения;</p>	<p>Майер Юлиус Роберт (1814 – 1878), немецкий естествоиспытатель, врач. Первым сформулировал закон сохранения энергии (эквивалентности механической работы и теплоты</p>	<p>Дальтон Джон (1766 – 1844). английский химик и физик. Первым определил атомные веса (массы) ряда элементов .</p>
--	---	---	--	---

Томсон Уильям (1824-1907), английский физик. В 1892 году за научные заслуги получил титул барона Кельвина. Открыл второй закон термодинамики, предложил абсолютную шкалу температур;	Отто Николаус Август (1832-1891), немецкий конструктор. В 1895 году создал 4-х тактный газовый двигатель внутреннего сгорания;	Карно Никола Лазар Сади (1796-1832), французский физик и инженер, один из основателей термодинамики. Рассмотрел идеальный термодинамический цикл и доказал теорему, названную его именем;	Дизель Рудольф ((1858-1913), немецкий инженер. В 1897 году создал двигатель внутреннего сгорания, названный его именем	Амага (1841-1915) сформулировал закон: сумма парциальных объёмов составляющих смесь газов равна объёму все смеси
--	--	---	--	--

Рис.2. Краткий исторический очерк

Из советских ученых наиболее значительный вклад в термодинамику внесли: академик Кириллин Владимир Алексеевич (1913-1999). Труды по теплофизическим свойствам различных веществ и термодинамическим свойствам веществ при высоких температурах; академик Сычев Вячеслав Владимирович (1924 -). Труды по механике жидкостей и газов; труды М.П. Вукаловича, И.И.Новикова в МЭИ, Д.А. Тимрота и Н.Б. Варгафтика в ВТИ и др.

На рис.3 приведена структура основных понятий технической термодинамики. Первое из них «ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ СИСТЕМА» представляет собой совокупность материальных тел, находящихся в тепловом и механическом взаимодействиях, второе - «ВНЕШНЯЯ СРЕДА» - это совокупность материальных тел в термодинамической системе, окружающих «РАБОЧЕЕ ТЕЛО» и взаимодействующих через «КОНТРОЛЬНУЮ ПОВЕРХНОСТЬ» или «ОБОЛОЧКУ» с этим телом. В качестве внешней среды могут выступать поверхности лопаток, корпусов и других деталей тепловых двигателей.

РАБОЧЕЕ ТЕЛО – это вещество, находящееся в термодинамической системы в виде газа, жидкости, твердого тела и плазмы. В тепловых двигателях в качестве рабочего тела рассматривается газ.

ИДЕАЛЬНЫЙ ГАЗ- это совокупность молекул, соударение между которыми отсутствует. Молекулы совершают поступательное, вращательное и колебательное движения.

РЕАЛЬНЫЙ ГАЗ – это совокупность молекул, которые между собой взаимодействуют различным образом, в том числе при соударении.

Рабочее тело имеет конкретные физические условия, которые принято называть ПАРАМЕТРАМИ СОСТОЯНИЯ. К ним относится:

ДАВЛЕНИЕ – отношение распределенной силы на единицу поверхности. Измеряется в ПАСКАЛЯХ – давление силой в 1 Н, равномерно распределенной по поверхности площадью 1 м². Наряду с паскалем употребляются более крупные единицы – килопаскаль (кПа) и мегапаскаль (МПа);

$$1 \text{ Па} = 10^{-3} \text{ кПа} = 10^{-6} \text{ МПа}.$$

Различают абсолютное давление p и избыточное давление $p_{\text{изб}}$; последнее измеряется различными типами манометров. Абсолютное давление больше избыточного на величину атмосферного (барометрического) давления B_0 . Если абсолютное давление внутри рабочего тела меньше атмосферного, то регистрирующие приборы (вакууметры) измеряют разрежение $p_{\text{вак}}$ - разность между атмосферным давлением и давлением внутри тела.

В термодинамике всегда используется абсолютное давление. Оно измеряется в $\frac{H}{m^2}$ (Паскаль – Па), а также в $\frac{кгс}{см^2}$, мм рт. ст., мм вод. ст.

Если манометр U - образный, то пересчет показаний манометра производится следующим образом:

Вода

$$(\rho = 0.99823 \cdot 10^3 \frac{кг}{м^3}; g = 9.80665 \frac{м}{с^2}; p = \frac{H}{0.102152} \text{ Па, } H \text{ в мм вод.ст.})$$

Ртуть

$$(\rho = 13.5458 \cdot 10^3 \frac{кг}{м^3}; g = 9.80665 \frac{м}{с^2}; p = \frac{H}{7.5279 \cdot 10^{-3}} \text{ Па, } H \text{ в мм рт.ст.})$$

или $p = 133.2H$)

	Термодинамическая система	
Внешняя среда		Рабочее тело
	Идеальный газ	
	Параметры состояния идеального газа	
Давление $p, \text{Па}$	Температура $T, \text{К}$	Удельный объем

		$m^3 / кг$
	Энергии рабочего тела	
Внутренняя энергия Δu	Работа Газовая постоянная $R, \frac{Дж}{кг \cdot K}$	Теплота $q, \frac{Дж}{кг}$
	Теплоёмкость рабочего тела	
При постоянном объёме c_v	При постоянном давлении c_p	В зависимости от процесса c_x
	Термодинамические процессы идеальным газом	
Изохорный $v = const$	Изобарный $p = const$	Изотермический $T = const$
	Адиабатный $pv^k = const$	
	Политропный $pv^n = const$	
	Циклы тепловых машин с идеальным газом	
Карно	Отто	Дизель
	С регенераций тепла	

Рис.3. Структура основных понятий в технической термодинамике

Таблица 1.2. Соотношения между различными единицами измерения давления

Единица	Наименование единицы				
	Па	бар	кгс/см ²	мм рт. ст.	мм вод. ст.
1 Па	1	10^{-5}	$1,02 \cdot 10^{-5}$	$7,5024 \cdot 10^{-3}$	0,102
1 бар	10^5	1	1,02	$7,5024 \cdot 10^2$	$1,02 \cdot 10^4$
1 кгс/см ²	$9,8067 \cdot 10^4$	0,98067	1	735	10^4
1 мм рт. ст.	133	$1,33 \cdot 10^{-3}$	$1,36 \cdot 10^3$	1	13,6
1 мм вод. ст.	9,8067	$9,8067 \cdot 10^{-5}$	10^{-4}	$7,35 \cdot 10^{-2}$	1

ТЕМПЕРАТУРА – степень нагретости рабочего тела. Измеряется по шкалам Цельсия (°C), Фаренгейта (°F), Кельвина (K), Ренкина (Ra), Реомюра (°R).

Т а б л и ц а 1.1. Соотношения между различными температурными шкалами

Наименование шкал	Шкала Цельсия $t, ^\circ\text{C}$	Шкала Ренкина $T, ^\circ\text{Ra}$	Шкала Фаренгейта $t, ^\circ\text{F}$	Шкала Реомюра $t, ^\circ\text{R}$
Шкала Цельсия, $^\circ\text{C}$	—	$\frac{5}{9} T^\circ\text{Ra} - 273,15$	$\frac{t^\circ\text{F} - 32}{1,8}$	$1,25 t^\circ\text{R}$
Шкала Ренкина, $^\circ\text{Ra}$	$1,8 \times (t^\circ\text{C} + 273,15)$	—	$t^\circ\text{F} + 459,67$	$1,8 (1,25 t^\circ\text{R} + 273,15)$
Шкала Фаренгейта, $^\circ\text{F}$	$1,8 t^\circ\text{C} + 32$	$t^\circ\text{Ra} - 459,67$	—	$\frac{9}{4} t^\circ\text{R} + 32$
Шкала Реомюра, $^\circ\text{R}$	$0,8 t^\circ\text{C}$	$0,8 \left(\frac{5}{9} T^\circ\text{Ra} - 273,15 \right)$	$\frac{4}{9} (t^\circ\text{F} - 32)$	—

УДЕЛЬНЫЙ ОБЪЁМ – это объём, занимаемый единицей массы вещества, измеряется в $\text{м}^3/\text{кг}$ или $\text{см}^3/\text{г}$.

ПЛОТНОСТЬ, величина, обратная удельному объёму..

На рис.4 (на экране) показано развитие уравнения состояния идеального газа. В основе этого уравнения лежат:

закон **Бойля Роберта** ((1627-1691), английского физика и химика, открытый им в 1662 году, и **Мариотта Эдм** (1620-1684), французского физика, открывшего этот же закон в 1676 году: **при постоянной температуре произведение давления на его объём постоянно** $pV = const$:

закон **Шарля Жореса** (1745-1823), французского ученого, открывшего в 1787 году: **давление идеального газа неизменной массы и объёма возрастает при нагревании линейно** $p_i = p_o(1 + \alpha t)$, где p_o – давление при температуре 0°C ; $\alpha = \frac{1}{273} \text{K}^{-1}$ – коэффициент пропорциональности;

закон **Гей-Люссака Жоржа**, открывшего этот закон в 1802 году; **если давление газа в процессе нагрева поддерживается неизменным, то его объём при нагреве будет увеличиваться с ростом температуры линейно** $V_i = V_o(1 + \alpha t)$;

закон **Клапейрона Бенуа Поля Эмиля** (1799-1864), французского физика и инженера, открывшего этот закон в 1834 году: **зависимость между физическими величинами, определяющими состояние идеального газа**

$$pV = BT, \text{ где } B = \frac{m}{\mu}, m - \text{масса газа; } \mu - \text{молекулярная масса;}$$

Закон **Менделеева Дмитрия Ивановича** (1834-1907), русского химика и физика, открывшего закон состояния в 1874 году для одного моля идеального газа $pv = RT$.

Для определения газовой постоянной идеального газа используем уравнение Менделеева – Клапейрона $pv = R_\mu T$. Подставляя в эту формулу

нормальные условия, получаем $R_{\mu} = \frac{101325 \cdot 22.4136}{273.15} = 8314 \frac{\text{Дж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}}$ - универсальная газовая постоянная. Отсюда получаем соотношение газовой постоянной для любого идеального газа $R = \frac{8314}{\mu}$, где $\mu \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}$ - молярная масса газа - масса одного киломоля газа.

Задача. На весах стоят две одинаковые банки. В одной из них сухой воздух, в другой - влажный. Какая банка тяжелее?

Решение.

Напишем уравнение состояния для сухой и влажной банок:

$$p_1 V_1 = m_1 R_1 T_1 \text{ - сухая банка;}$$

$$p_2 V_2 = m_2 R_2 T_2 \text{ - влажная банка.}$$

Имея в виду, что $p_1 = p_2, V_1 = V_2, T_1 = T_2$ после деления этих соотношений друг на друга, получаем $\frac{m_1}{m_2} = \frac{R_2}{R_1}$.

Масса одного киломоля сухого воздуха равна $\mu_1 = 28.966 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}$, отсюда газовая постоянная сухого воздуха равна $R_1 = \frac{8314}{28.966} = 287 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$.

Масса одного киломоля влажного пара H_2O равна $\mu_2 = 18 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}$. Отсюда газовая постоянная влажного пара равна $R_2 = \frac{8314}{18} = 462 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$.

Таким образом $\frac{m_1}{m_2} = \frac{R_2}{R_1} = \frac{462}{287} = 1.6$. Имея в виду одинаковое для обеих банок ускорение свободного падения, получаем, что банка с сухим воздухом тяжелее в 1.6 раза.

<p>Закон Бойля Роберта (1627-1691) Открыт в 1676 году $pV = const$</p>
<p>Закон Шарля Жореса (1745-1823) Открыт в 1787 году $V_i = V_o(1 + \alpha t)$</p>

$\alpha = \frac{1}{273} K^{-1}$	
Закон Гей-Люссака Жоржа Открыт в 1802 году $p_i = p_o(1 + \alpha t)$ $\alpha = \frac{1}{273} K^{-1}$	
Закон Клапейрона Бенуа Поля Эмиля (1799-1864) Открыт в 1834 году $pV = BT$, где $B = \frac{m}{\mu}$, m – масса газа; μ – молекулярная масса	
Закон Менделеева Дмитрия Ивановича (1834-1907) Открыт в 1874 году $pv = RT$.	

Рис.4. Развитие уравнения состояния идеального газа

Задача. Определить газовую постоянную для следующих газов: CO_2 ; H_2 ; CH_4 .

Решение.

$$R_{CO_2} = \frac{8314}{\mu_{CO_2}} = \frac{8314}{44} = 189 \frac{Дж}{кг \cdot K}; R_{H_2} = \frac{8314}{\mu_{H_2}} = \frac{8314}{2} = 4157 \frac{Дж}{кг \cdot K};$$

$$R_{CH_4} = \frac{8314}{\mu_{CH_4}} = \frac{8314}{16} = 520 \frac{Дж}{кг \cdot K}$$

Задача. Определить газовую постоянную смеси газов, состоящую из 78 % азота и 22 % кислорода.

Решение.

На основании уравнения Клапейрона для i -го компонента идеальной газовой смеси, занимающей объём $V_{см}$ можно написать:

Записав эти уравнения для всех компонентов смеси и просуммировав их левые и правые части, получим:

В соответствии с законом Дальтона $\sum_{i=1}^n p_i = p_{см}$ получаем:

$p_{см}V_{см} = m_{см}R_{см} T_{см}$, где $R_{см}$ – газовая постоянная смеси.

Таким образом можно получить соотношение:

$$R_{см} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i R_i}{m_{см}} = \sum_{i=1}^n c_i R_i = 8314 \sum_{i=1}^n \frac{c_i}{\mu_i} = 8314 \cdot \left(\frac{0.78}{28} + \frac{0.22}{32} \right) = 288.76 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

Уравнение состояния идеального газа написанное выше представляется в интегральной форме. Если продифференцировать уравнение состояния то получим $p dv + v dp = R dT$, которое представляет собой процесс, показанный на рис.5 (на экране). Здесь произведение $dl_v = p dv$ называют **ДЕФОРМАЦИОННОЙ РАБОТОЙ**, а произведение $dl_p = v dp$ - **ТЕХНИЧЕСКОЙ РАБОТОЙ**.

В первом случае работа связана с изменением объёма (например, в цилиндре поршневого двигателя), а во втором случае – с изменением давления (например, в компрессоре или турбине газотурбинного двигателя).

Уравнение состояния для реального газа было составлено **Ван-дер-Ваальсом Йоханнес Дидериком (1837-1923)**, нидерландским физиком (Лауреатом Нобелевской премии в 1910 г.) в 1873 году, которое учитывает размеры молекул и межмолекулярные силы притяжения; для одного моля представляется так:

$$\left(p + \frac{a}{v^2} \right) (v - b) = RT, \text{ где } b \text{ – учитывает конечность объёма молекул;}$$

a – учитывает межмолекулярное давление.

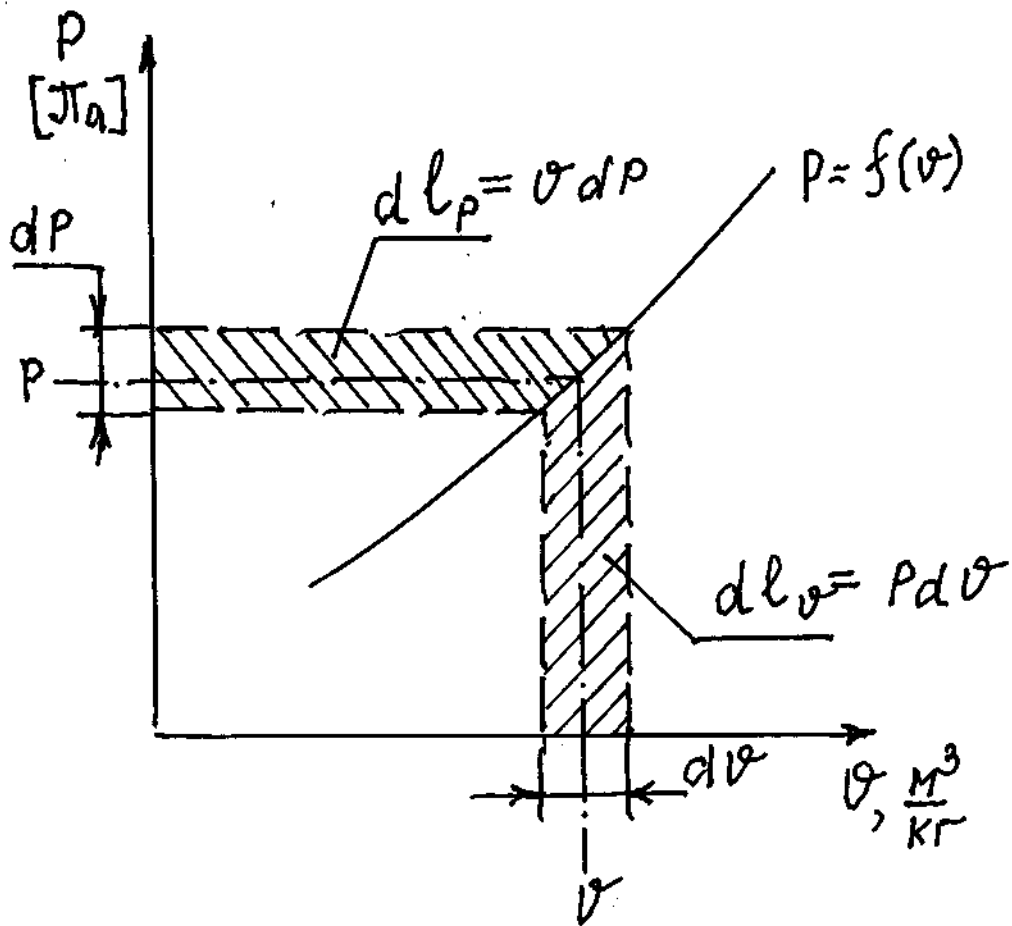


Рис.5. Уравнение состояния идеального газа в дифференциальной форме

Примеры

**билетов к зачету по дисциплине «Термодинамика и теплопередача»
для студентов 3 курса Механического факультета по спец. 160901**

Московский государственный технический Университет гражданской авиации

Кафедра «Двигатели летательных аппаратов»

Зав.кафедрой

Никонов В.В.

« » 2007 г.

Учебная дисциплина «Термодинамика и теплопередача»

билет № 1

1. Поясните содержание понятий «Рабочее тело тепловых машин» и внешняя среда».

Задача. Определить газовую постоянную для следующих газов: CO_2 , H_2 , CH_4 .

2. Изобразите и поясните цикл С.Карно в p, v и T, S координатах. Укажите на графиках площади фигур, соответствующих: работе сжатия и расширения в цикле: количество теплоты, подведенное и отведенное от рабочего тела в цикле.

**Задача. Определить термический КПД цикла С.Карно, если известны:
 $T_1 = 288K$, $T_2 = 1500K$.**

3. Напишите и поясните уравнение неразрывности.

Задача. Как изменится расход воздуха через двигатель, если на вход его поступают: - посторонние предметы; - горячие газы от других двигателей.

Московский государственный технический Университет гражданской авиации

Кафедра «Двигатели летательных аппаратов»

Зав.кафедрой

Никонов В.В..

« » 2007 г.

Учебная дисциплина «Термодинамика и теплопередача»

Билет № 2

1. Поясните содержание понятия «Параметры состояния рабочего тела». Укажите, какие параметры состояния измеряются в эксплуатации авиационных двигателей термометрами сопротивления, термопарами и трубками Пито.

Задача. Определить газовую постоянную смеси газов, состоящую из 78 % азота и 22 % кислорода.

2. Приведите и поясните алгоритм расчета параметров состояния в контрольных точках цикла С.Карно.

Задача. Определить удельную работу сжатия L_v в адиабатном процессе, если известны параметры состояния в начале процесса (T_1, p_1, v_1) и в конце процесса (T_2, p_2, v_2).

3. Напишите и поясните уравнение сохранения энергии в общем виде с учетом трения.

Задача. Определить число Маха воздушного судна в полете со скоростью 2000 км/ч, на высоте 18 км ($T_H = 295K$).

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ

УНИВЕРСИТЕТ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ

Кафедра «Двигатели летательных аппаратов»

В.Т. Шулекин, В.В. Медведев, Н.Д. Тихонов, В.В. Дворниченко

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

по дисциплине

«ТЕРМОДИНАМИКА И ТЕПЛОПЕРЕДАЧА»

для студентов

специальности 160901

дневной и заочной форм обучения

Москва – 2007

Настоящий лабораторный практикум издается в соответствии с учебным планом для студентов специальности 160901 всех форм обучения. Практикум содержит описание семи лабораторных работ по дисциплине «Термодинамика и теплопередача».

Рассмотрено и одобрено на заседаниях кафедры от 27.03.2007г. , протокол № 6 и методического совета специальности от 27.03.2007 г.

Рецензент, профессор, д.т.н. Коняев Е.А.

Содержание	Стр.
Введение.....	4
1. Определение теплоемкости воздуха.....	6
2. Исследование газовых процессов в элементах ТРД.....	14
3. Исследование циклов тепловых двигателей.....	20
4. Новые циклы авиадвигателей	31
5. Исследование сопла трения и подогрева.....	40
6. Определение коэффициента теплопроводности латунного стержня.....	48
7. Определение коэффициента теплоотдачи в условиях естественной конвекции.....	55
Список использованных источников	63

Введение

Учебная дисциплина "Термодинамика и теплопередача" является общей профессиональной дисциплиной учебного плана подготовки студентов по специальности 160901 "Техническая эксплуатация летательных аппаратов и двигателей".

Настоящий лабораторный практикум имеет целью привить студентам практические навыки и умения по экспериментальному и расчетному исследованию типовых задач термодинамики и теплопередачи.

Авиационный газотурбинный двигатель (ГТД) является **тепловой машиной**, в которой подводимое за счет химических реакций окисления топлива выделяемое количество теплоты преобразуется в полезную работу либо в виде приращения кинетической энергии струи **рабочего тела** (воздуха), проходящего через двигатель, либо в виде избыточного крутящего момента, который с помощью вала передается на воздушный винт.

Основными элементами ГТД являются **входное устройство, компрессор, камера сгорания, турбина и выходное устройство**. Сумму механической работы, отводимой от двигателя, и кинетической энергии на его выходе называют **свободной или полезной работой ГТД**.

Предметом технической термодинамики является изучение процессов, происходящих в ГТД как тепловой машине, определение условий, при которых эффективность этой машины является максимальной, исследование основных закономерностей преобразования теплоты в работу.

Предметом теплопередачи является изучение процессов теплообмена, которые играют определяющую роль в теплотехнике при создании конкретных элементов ГТД (турбинных лопаток, корпусов, дисков, теплоизоляционных покрытий и т.д.). К основным видам теплообмена относятся **теплопроводность, конвекция и тепловое излучение**.

Теплопроводностью называют молекулярный перенос теплоты в сплошной среде. Этот процесс возникает при неравномерном распределении температур в среде. В этом случае теплота передается путем непосредственного соприкосновения частиц, имеющих различную скорость, что приводит к обмену энергией между молекулами, атомами или свободными электронами.

Конвекцией называют движение теплоносителя (жидкости или газа) и перенос теплоты при этом в пространстве. Теплообмен между жидкостью или газом с поверхностью твердого тела называют **конвективным теплообменом**. Процесс теплообмена между двумя теплоносителями, разделенными твердой стенкой, называют **теплопередачей**.

Конвективный теплообмен - весьма сложное явление, которое описывается системой дифференциальных уравнений, состоящей в общем случае из уравнений теплообмена, энергии, движения, неразрывности, диффузии и состояния. Дифференциальные уравнения отражают лишь самые общие черты явления, в них отсутствуют индивидуальные признаки конкретного единичного случая. Выделение конкретного случая из общего класса явлений конвективного теплообмена осуществляется дополнением системы уравнений условиями однозначности.

Ввиду чрезвычайной сложности системы дифференциальных уравнений конвективного теплообмена и условий однозначности, содержащих большое количество переменных, аналитическое решение ее не может быть получено в общем случае. Эти уравнения могут быть решены в отдельных случаях при существенных упрощающих предположениях.

Теория подобия устанавливает условия подобия физических явлений и на этой основе дает возможность существенно сократить число переменных. Она также дает правила рационального объединения физических величин в безразмерные комплексы - **критерии**, число которых существенно меньше числа величин, из которых они состоят. В результате использования этих критериев расчет конвективного теплообмена сводится к решению **критериальных уравнений**, и определению, в конечном итоге, **коэффициента теплоотдачи α** .

Тепловое излучение - процесс распространения теплоты электромагнитными волнами. Этот вид теплоты обусловлен превращением внутренней энергии вещества в энергию излучения и его поглощением веществом.

ЛР-1 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОЕМКОСТИ ВОЗДУХА (4 часа)

- Цель работы:**
1. Экспериментальное определение средней массовой теплоемкости воздуха при постоянном давлении c_{pm} .
 2. Ознакомление с методикой измерений и обработки опытных данных.

Задание на работу

1. В рабочей тетради изобразить схему лабораторной установки для определения теплоемкости воздуха и указать ее основные элементы.
2. Ознакомиться с принципом действия установки. Подготовить установку для проведения эксперимента.
3. Ознакомиться с основными сведениями и с методикой обработки опытных данных.
4. Произвести измерения:
 - температуры t_0 и давления p_0 наружного воздуха в лаборатории;
 - температуры воздуха на выходе из термостата t_1 ;
 - напряжения u_B и силы тока I_B в цепи нагревателя;
 - перепада давлений на мерной диафрагме h_B .
5. Выполнить обработку экспериментальных данных.
6. Оформить отчет по лабораторной работе.

Основные сведения

Отношение количества теплоты δQ , полученного рабочим телом при бесконечно малом изменении его состояния, к связанному с этим изменением температуры dT называют **теплоемкостью рабочего тела** [1,2,3]:

$$c_x = \frac{\delta Q}{dT} \quad (1.1)$$

Обозначение δQ вместо dQ показывает на их различие в зависимости от процесса подвода теплоты. Индекс «x» используется для обозначения того или иного процесса. Например, обозначая $x \rightarrow p$ получаем выражение для теплоемкости в изобарном процессе ($p = const$):

$$c_p = \frac{dQ}{dT} \quad (1.2)$$

При $x \rightarrow T$ получаем выражение для теплоёмкости в изотермическом процессе ($T = const$) $c_T \rightarrow \infty$; при $x \rightarrow k$ получаем $c_k = 0$ (теплообмен

между внешней средой и рабочим телом в адиабатном процессе $pv^k = const$ отсутствует); при $x \rightarrow v$ получаем c_v в изохорном процессе ($v = const$).

Обычно теплоемкость относят к единице количества вещества и в зависимости от выбранной единицы различают:

- удельную массовую теплоемкость $c_m, \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$;
- удельную объемную теплоемкость $c_v, \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}}$;
- удельную мольную теплоемкость $\mu c, \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$.

Зависимость теплоемкости от характера процесса может быть представлена графически (рис.1.1). Здесь произвольный процесс представляется политропным

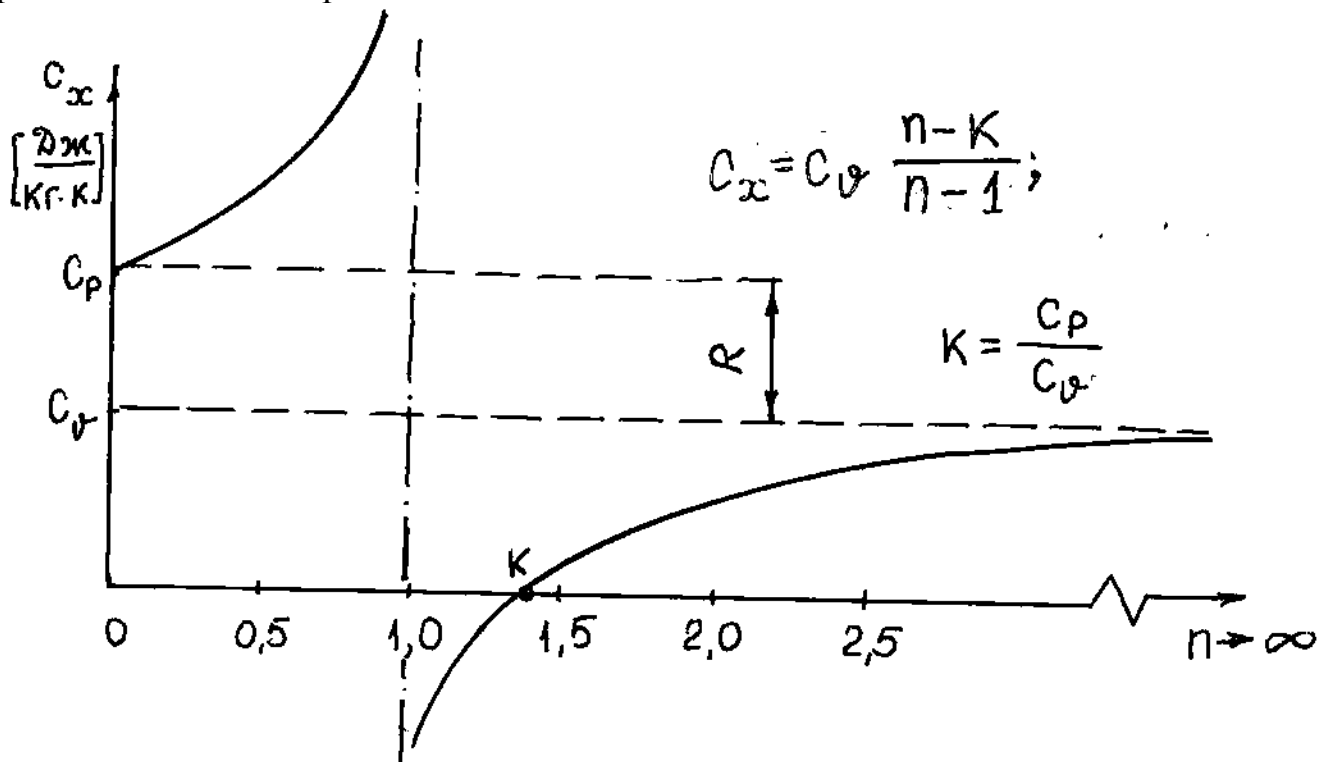


Рис.1.1. Зависимость удельной массовой теплоемкости от показателя политропы n

($pv^n = const$), где n – показатель политропы, может принимать значения $-\infty < n < +\infty$. Теплоёмкость политропного процесса находится по формуле:

$$c_x = c_v \frac{n - k}{n - 1} \quad (1.3)$$

Для идеального газа, молекулы которого имеют массу, бесконечно малые размеры и не взаимодействуют друг с другом (кроме столкновений), существует связь между теплоёмкостями c_p и c_v , полученная впервые

Юлиусом Робертом Майером (1814 – 1878) – немецким естествоиспытателем и врачом, в 1847 году:

$$c_p - c_v = R, \quad (1.4)$$

где R - газовая постоянная идеального газа представляет собой работу совершаемую 1 кг газа в процессе постоянного давления при изменении температуры на один градус, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$. Численное значение R определяется из соотношения:

$$R = \frac{R\mu}{\mu} \quad (1.5)$$

Здесь $R\mu = 8314 \frac{\text{Дж}}{\text{моль}\cdot\text{К}}$ - универсальная газовая постоянная (для всех газов); $\mu, \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$ - масса одного моля газа. Например, для сухого воздуха

$$\mu = 28.966 \frac{\text{кг}}{\text{моль}}, R = \frac{8314}{28.966} = 287 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}, \quad \text{для} \quad \text{водяного} \quad \text{пара}$$

$$H_2O \mu = 18 \frac{\text{кг}}{\text{моль}}, R = \frac{8314}{18} = 462 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}.$$

Чем больше R , тем больше требуется работы, например, для сжатия газа в компрессоре газотурбинного двигателя.

В изохорном процессе ($v = \text{const}$) теплота, сообщаемая газу, идёт только на изменение его внутренней энергии (впервые установлено в 1843 году английским физиком **Деймсом Прескотт Джоулем** (1818 – 1889)). Это видно из уравнения первого закона термодинамики:

$$\delta q = c_v dT + p dv, \quad (1.6)$$

где $p dv = 0$, тогда как в изобарном процессе ($p = \text{const}$) теплота расходуется на изменение внутренней энергии и на совершение работы против внешних сил ($p dv > 0$). Поэтому c_p больше c_v на величину этой работы.

В адиабатном процессе ($p v^k = \text{const}$), протекающем без теплообмена между рабочим телом и внешней средой ($q = 0$), **отношение**

теплоёмкостей $k = \frac{c_p}{c_v}$ **называют показателем адиабаты.** Для воздуха

как идеального газа (доля кислорода в сухом воздухе составляет 20.9476 % [4], доля азота - 78.064 %), теплоёмкость которого не зависит от температуры $\kappa = 1.4$, для продуктов сгорания авиационного керосина $k = 1.33$.

Величина теплоёмкостей c_p и c_v с учётом показателя адиабаты находится из решения системы уравнений:

$$\begin{cases} c_p - c_v = R \\ k = \frac{c_p}{c_v} \end{cases}$$

Отсюда

$$c_p = \frac{kR}{k-1}; c_v = \frac{R}{k-1}. \quad (1.7)$$

Для реальных газов $c_p - c_v > R$, поскольку при их расширении в изобарном процессе совершается работа не только против внешних сил, но и против сил притяжения, действующих между молекулами, что вызывает дополнительный расход теплоты. При увеличении температуры у многоатомных молекул происходит возбуждение внутренних степеней свободы за счет возникновения колебательного движения атомов молекулы (молекула становится осциллятором). Это приводит к увеличению внутренней энергии, а следовательно, и теплоемкости с ростом температуры.

Поскольку теплоемкость реального газа зависит от температуры, в технической термодинамике различают истинную (найденную по формуле (1.1)) и среднюю теплоемкости.

Средняя теплоемкость процесса находится по формуле:

$$c_{cp} \int_{t_1}^{t_2} = \frac{q}{t_2 - t_1} \quad \text{или} \quad c_{cp} \int_{t_1}^{t_2} = \frac{c_{cp} \int_0^{t_2} - c_{cp} \int_0^{t_1}}{t_2 - t_1} \quad (1.8)$$

В теплотехнических расчетах теплоемкости c_p или c_v находят по формуле:

$$c = a_0 + a_1 T + a_2 T^2 + a_3 T^3 + \dots \quad (1.9)$$

Например, для расчета теплоемкости сухого воздуха рекомендуется следующая формула:

$$c_{pm} = 0.9952 + 0.9349 \cdot 10^{-4} t \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \quad (1.10)$$

Описание лабораторной установки

Установка (рис.1.2) состоит из электромотора 1, частота вращения которого регулируется реостатом 2; вентилятора 3; мерной диафрагмы 4; электрического нагревателя 5, мощность которого регулируется реостатом 6; термостата 7; амперметра 8; вольтметра 9, с помощью которых

определяется мощность нагревателя на каждом режиме, термометра 10, с помощью которого измеряется температура нагретого воздуха в термостате; микроманометра 11, с помощью которого измеряется перепад статического давления на мерной диафрагме 4.

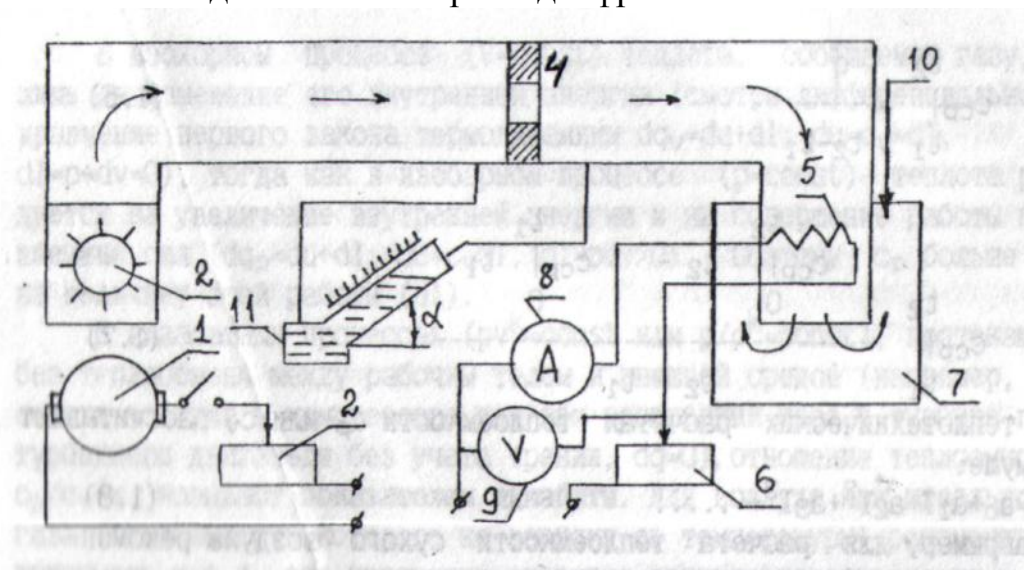


Рис.1.2. Принципиальная схема лабораторной установки для определения теплоемкости воздуха:

1 - электромотор; 2,6 - реостаты; 3 - вентилятор; 4 - мерная диафрагма;
5 - нагревательный элемент; 7 - термостат; 8 - амперметр;
9 - вольтметр; 10 – термометр; 11 – микроманометр;
 α - угол наклона микроманометра к горизонтали

Принцип действия установки состоит в следующем. Воздух из лаборатории с температурой t_0 и давлением p_0 засасывается вентилятором 3 и подаётся по трубопроводу 10 к электронагревателю 5 открытого типа. Для полного исключения потерь тепла в окружающую среду нагреватель помещён в термостат.

Расход воздуха через трубопровод регулируется частотой вращения вентилятора.

Для определения расхода в трубопроводе 10 установлена мерная диафрагма (рис.1.3), представляющая собой диск с отверстием круглого сечения, центр которого лежит на оси трубопровода. Сужение воздушного потока начинается на некотором расстоянии от диафрагмы и на некотором расстоянии за диафрагмой поток достигает минимального сечения [5]. Далее поток постепенно расширяется до полного сечения трубопровода.

Как видно из рис.1.3, давление за диафрагмой полностью не восстанавливается (перед диафрагмой происходит дросселирование струи – ускорение потока, а непосредственно за диафрагмой давление не может сразу восстановиться, поэтому появляется разность давлений

$\Delta p = p_2 - p_1$). Разность давлений на диафрагме зависит от скорости потока в отверстии, или, что то же самое, от объёмного расхода воздуха $V = F_{\text{отв}} c_{\text{отв}}$, где $F_{\text{отв}}$ - площадь отверстия, $c_{\text{отв}}$ - скорость воздуха в отверстии, а также от интенсивности вихрей, образующихся до и после диафрагмы («мертвая» зона на рис.1.3).

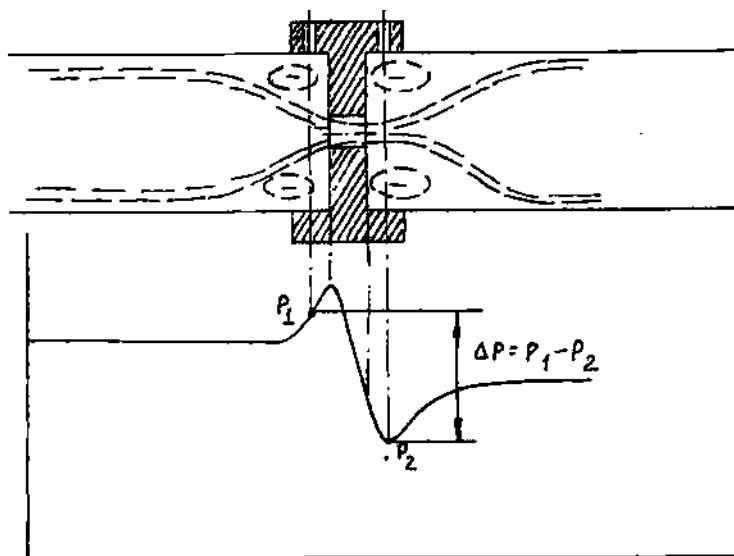


Рис.1.3. Характер потока и распределение статического давления при установке в трубопроводе диафрагмы

Таким образом, в лабораторной установке реализуется изобарный подвод теплоты к потоку воздуха. Уравнение теплового баланса для установки представляется так:

$$G_{\text{в}} c_{\text{рм}} (T_1 - T_0) = I_{\text{в}} V_{\text{в}}, \quad (1.11)$$

где $G_{\text{в}} = V \rho_{\text{в}}$ - массовый расход воздуха в трубопроводе, кг/с;

$\rho_{\text{в}}$ - плотность воздуха, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$; T_1 - температура воздуха на выходе из термостата; $c_{\text{рм}}$ - средняя массовая теплоёмкость воздуха при постоянном давлении; $I_{\text{в}}, V_{\text{в}}$ - сила тока и напряжение в цепи нагревателя.

Для определения объёмного расхода воздуха, проходящего через диафрагму, рекомендуют следующую формулу [5]:

$$V = \mu \varepsilon k_t F_{\text{отв}} \sqrt{\frac{2 \Delta p}{\rho_{\text{в}}}}, \frac{\text{м}^3}{\text{с}},$$

где $\mu = 0.82$ - коэффициент расхода мерной диафрагмы; $\varepsilon = 1.0$ - коэффициент, учитывающий сужение струи; $k_t = 1.0$ - температурный поправочный коэффициент; $F_{\text{отв}} = \frac{\pi d_{\text{отв}}^2}{4} = 7.85 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$; $d_{\text{отв}} = 0.01 \text{ м}$ - диаметр отверстия в диафрагме;

$\Delta p = h_B \sin \alpha$ - перепад давления в диафрагме, $\frac{H}{M^2}$; $\alpha = 30^\circ$ - угол наклона микроманометра к горизонту.

Подставляя значения коэффициентов в формулу, с учётом масштаба измерительной части микроманометра и его показаний в мм водяного столба, получаем расчётную формулу:

$$V = 6.45 \cdot 10^{-3} \sqrt{\frac{h_B}{\rho_B}}, \frac{M^3}{c} \quad (1.12)$$

Порядок проведения экспериментов и методика обработки опытных данных

Перед началом проведения экспериментов необходимо подготовить таблицы 1.1 и 1.2.

Порядок обработки опытных данных следующий:

1. Определяются параметры состояния окружающего воздуха в лаборатории:

$$T_0 = t_0 + 273, K; p_0 = B_0 \cdot 133.2 \frac{H}{M^2},$$

где B_0 - барометрическое давление, мм рт.ст.

Таблица 1.1

Номер Опыта	Перепад давления на мерной диафрагме, h_B , мм вод. ст.	Температура воздуха на выходе из нагревателя, t_1 , $^\circ C$	Сила тока в цепи нагревателя, I_B , А	Напряжение на клеммах спирали нагревателя, U_B , В
1				
2				
3				

Таблица 1.2

Номер Опыта	Объёмный расход воздуха, V , $\frac{M^3}{c}$	Массовый расход воздуха, G_B , $\frac{кг}{c}$	Количество теплоты, подведенное к воздуху, Q_B , Вт	Повышение температуры воздуха в нагревателе, ΔT_B , К	Средняя массовая теплоемкость воздуха, $c_{рт}$, $\frac{Дж}{кг \cdot К}$
1					
2					
3					

2. Рассчитывается плотность воздуха из уравнения состояния (выведено **Клапейроном Бенуа Полем Эмилем** (1799 – 1864) французским физиком и инженером в 1834 году и дополнено **Дмитрием Ивановичем Менделеевым** (1834 – 1907), российским химиком, для одного моля идеального газа в 1874 году):

$$\rho_{\text{в}} = \frac{P_0}{RT_0} \cdot \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}, \text{ где } R = 287 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} - \text{газовая постоянная сухого воздуха.}$$

3. Определяется объёмный расход воздуха в трубопроводе по формуле (1.12).

4. Рассчитывается массовый расход воздуха:

$$G_{\text{в}} = \rho_{\text{в}} V, \frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

5. Количество теплоты, подведенное к воздуху в нагревателе:

$$Q_{\text{в}} = I_{\text{в}} U_{\text{в}}, \frac{\text{Дж}}{\text{с}} \text{ или Вт}$$

6. Повышение температуры в нагревателе:

$$\Delta T_{\text{в}} = T_1 - T_0, \text{ где } T_1 = t_1 + 273, \text{ К}$$

7. Удельная средняя массовая теплоемкость воздуха в процессе при постоянном давлении:

$$c_{\text{рm}} = \frac{Q_{\text{в}}}{G_{\text{в}} \Delta T_{\text{в}}}, \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

Отчетность по лабораторной работе

Включает:

1. Принципиальную схему лабораторной установки с указанием ее основных элементов.

2. Результаты измерений параметров установки при проведении опытов и их обработки (табл. 1.1-1.2).

3. Алгоритм обработки экспериментальных данных.

Ответы на контрольные вопросы:

1. Что называют теплоемкостью рабочего тела?

2. Напишите и поясните уравнение первого закона термодинамики в дифференциальной форме.

3. Напишите и поясните уравнение состояния идеального газа.

4. Напишите и поясните уравнение Ю.Майера.

5. Напишите и поясните уравнение теплового баланса для лабораторной установки.

6. Приведите примеры использования теплоемкостей c_p и c_v в авиационной технике.

7. Принцип действия лабораторной установки.

8. Чем объяснить увеличение теплоемкости с ростом температуры?

ЛР-2 ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕМЕНТАХ ТРД (4 часа)

- Цель работы:**
1. Практическое освоение схемы и принципа действия турбореактивного двигателя.
 2. Приобретение навыков по расчету параметров состояния в контрольных сечениях проточной части ТРД.
 3. Сделать выводы, ответить на контрольные вопросы и оформить отчет по лабораторной работе.

Задание на работу

1. Для заданного значения **степени повышения давления** в компрессоре $\pi_K^* = 20$ и **степени подогрева** воздуха в двигателе

$\Delta = \frac{T_\Gamma^*}{T_H} = 6.5$ (величины π_K^* и Δ называются параметрами рабочего процесса (цикла) двигателя) определить:

- параметры состояния (действительные и заторможенные) воздуха или газа в контрольных сечениях проточной части (газовоздушного тракта) турбореактивного двигателя;

- энергетические показатели процессов в элементах ТРД:

а) количество теплоты, участвующее в процессе;

б) работу сжатия и расширения;

в) полезную работу цикла двигателя;

Исходные данные:

- рабочее тело - воздух (показатель адиабаты $\kappa = 1.4$, газовая постоянная $R_g = 287 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$, для газа $\kappa_\Gamma = 1.33$, $R_\Gamma = 287.5 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$);

- давление и температура в начальной точке "н":

$$p_H = 760 \text{ мм рт.ст.}, T_H = 288 \text{ К};$$

- скорость полета $V=0$.

2. Оформить отчет по лабораторной работе.

Основные сведения

Газотурбинным двигателем (ГТД) согласно ГОСТ 23851-79 [1] называют тепловую машину, в которой энергия сгорания топлива преобразуется в кинетическую энергию струи и в механическую работу на валу; основными элементами ГТД являются **компрессор, камера сгорания и газовая турбина**.

Турбореактивным двигателем (ТРД) или двигателем прямой реакции называют ГТД, в котором преобладающая часть энергии топлива преобразуется в кинетическую энергию струи. То есть основой ТРД является ГТД со следующими элементами: **входное устройство, компрессор, камера сгорания, турбина и выходное устройство** (рис.2.1).

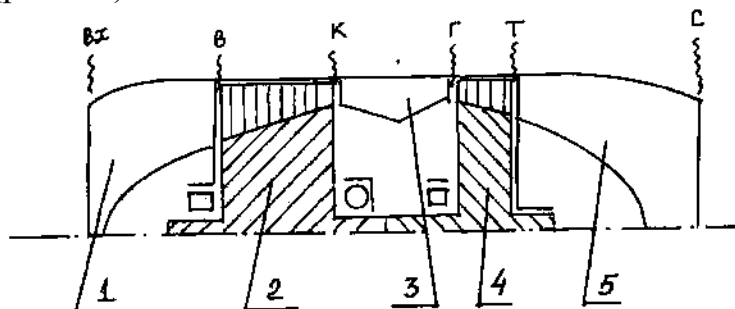


Рис.2.1. Принципиальная схема турбореактивного двигателя с осевым компрессором:

1 - входное устройство; 2 - компрессор; 3 - камера сгорания;
4 - турбина; 5 - выходное устройство;
вх, в, к, г, т, с - обозначения контрольных сечений проточной части двигателя

Рассмотрим принцип действия ТРД при работе на стенде ($H=0, V=0$).

1. Воздух из атмосферы поступает во входное устройство (в воздухозаборник), где происходит его **ускорение до скорости $c_B=180...220$ м/с**. То есть воздухозаборник на старте воздушного судна работает в режиме расширения.

Если принять течение воздушного потока в воздухозаборнике энергоизолированным и без трения, то течение воздуха адиабатное. Параметры состояния воздуха на выходе из воздухозаборника (сечение «В-В») находятся по формулам:

а) давление и температура заторможенного потока воздуха

$$T_B^* = T_H^* = T_H \quad (\text{при } V=0); \quad p_B^* = p_H^* = p_H;$$

б) действительная температура (из выражения для **полной энергии потока в сечении**) и статическое давление (из уравнения **адиабатного процесса торможения от p_B до p_B^***) в потоке

$$T_B = T_B^* - \frac{c_B^2}{2c_{pB}}; \quad p_B = p_B^* \left(\frac{T_B}{T_B^*} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}}; \quad c_{pB} = \frac{\kappa}{\kappa-1} R;$$

в) плотность и удельный объем воздуха (из уравнения состояния)

$$\rho_B = \frac{p_B}{RT_B}; \nu_B = \frac{1}{\rho_B}.$$

В этих формулах:

c_{pB} - средняя теплоемкость воздуха в изобарном процессе; R_B - газовая постоянная для воздуха.

2. Из воздухозаборника воздух поступает в компрессор, в котором происходит сжатие (плотность увеличивается). При отсутствии теплообмена рабочего тела - воздушного потока с окружающего средой (лопатками, корпусом и т.п.) и трения процесс сжатия в компрессоре адиабатный (температура и давление в процессе сжатия также возрастают). Параметры состояния воздуха на выходе из компрессора (сечение «К-К») находятся по формулам:

$$p_K^* = p_B^* \pi_K^*; T_K^* = T_B^* \pi_K^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}; T_K = T_K^* - \frac{c_K^2}{2c_{pB}};$$

$$p_K = p_K^* \left(\frac{T_K}{T_K^*} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}}; \rho_K = \frac{p_K}{RT_K}; \nu_K = \frac{1}{\rho_K}$$

Скорость воздушного потока на выходе из компрессора принимается равной $c_K = 100 \dots 120$ м/с.

3. Из компрессора воздух направляется в камеру сгорания, где к нему подводится теплота при сгорании топлива, впрыскиваемого топливными форсунками в камеру. Принимая процесс подвода теплоты **изобарным**, определяем параметры состояния газа на выходе из камеры сгорания (сечение «Г-Г»):

$$p_G^* = p_K^*; T_G^* = T_H \Delta; T_G = T_G^* - \frac{c_G^2}{2c_{pG}}; p_G = p_G^* \left(\frac{T_G}{T_G^*} \right)^{\frac{\kappa_G}{\kappa_G-1}};$$

$$\rho_G = \frac{p_G}{R_G T_G}; \nu_G = \frac{1}{\rho_G}; c_{pG} = \frac{\kappa_G}{\kappa_G-1} R_G.$$

Скорость потока газа на выходе из камеры сгорания принимается равной $c_G = 150 \dots 160$ м/с.

4. Из камеры сгорания поток газа направляется в турбину (сечение «Г-Г»), где происходит расширение газа (плотность уменьшается). Пренебрегая теплообменом между газом и лопатками и корпусом турбины, а также трением, процесс расширения газа принимается **адиабатным** (при расширении газа температура и давление также уменьшаются). Параметры состояния газа на выходе из турбины (сечение «Т-Т») находятся следующим образом:

а) из условия баланса мощностей турбины и компрессора в ТРД (или баланса удельных эффективных работ):

$$c_{pГ}(T_{Г}^* - T_{Т}^*) = c_{pВ}(T_{К}^* - T_{В}^*)$$

определяется температура заторможенного потока газа за турбиной $T_{Т}^*$.

б) задается приведенная скорость газа на выходе из турбины $\lambda_{Т} = 0.5 \dots 0.6$.

Действительная температура и статическое давление в потоке газа в данном сечении проточной части двигателя:

$$T_{Т} = T_{Т}^* \left(1 - \frac{\kappa_{Г}-1}{\kappa_{Г}+1} \lambda_{Т}^2 \right); p_{Т} = p_{Г} \left(\frac{T_{Т}}{T_{Г}} \right)^{\frac{\kappa_{Г}}{\kappa_{Г}-1}}; \rho_{Т} = \frac{p_{Т}}{R_{Г} T_{Г}}; v_{Т} = \frac{1}{\rho_{Т}};$$

в) давление заторможенного потока газа (полное давление) за турбиной

$$p_{Т}^* = \frac{p_{Т}}{\left(1 - \frac{\kappa_{Г}-1}{\kappa_{Г}+1} \lambda_{Т}^2 \right)^{\frac{\kappa_{Г}}{\kappa_{Г}-1}}}$$

5. Из турбины (сечение «Т-Т») газы направляются в выходное устройство (в реактивное сопло) двигателя, где происходит ускорение потока (температура, давление и плотность уменьшаются, а скорость увеличивается). Если принять, что течение в реактивном сопле энергоизолированное и трение отсутствует, то процесс расширения газа можно считать **адиабатическим**. Параметры состояния газа на выходе из сопла (сечение «С-С») при расширении до атмосферного давления $p_{Н}$ находятся по формулам:

$$p_{С} = p_{Н}; c_{С} = \sqrt{2c_{pГ}T_{Т}^* \left[1 - \left(\frac{p_{Н}}{p_{Т}^*} \right)^{\frac{\kappa_{Г}-1}{\kappa_{Г}}} \right]}; T_{С}^* = T_{Т}^*; T_{С} = T_{С}^* - \frac{c_{С}^2}{2c_{pГ}};$$

$$\rho_{С} = \frac{p_{С}}{R_{Г} T_{С}}; v_{С} = \frac{1}{\rho_{С}}$$

2. Энергетические показатели процессов в элементах ТРД:

а) входное устройство

Изменение внутренней энергии $\Delta u_{ВХ} = c_{vВ}(T_{В} - T_{Н})$, энтальпии (теплосодержания) $\Delta i_{ВХ} = c_{pВ}(T_{В} - T_{Н})$ и энтропии $\Delta s_{ВХ} = 0$ (так как теплообмен между потоком воздуха и внешней средой отсутствует, $q_{ВХ} = 0$). Работа против сил давления $l_{p ВХ}$ (техническая работа) во

входном устройстве находится из уравнения первого закона термодинамики:

$$q_{\text{ВХ}} = \Delta u_{\text{ВХ}} - l_{\text{р ВХ}} = 0;$$

б) компрессор

$$\Delta u_{\text{К}} = c_{\text{VВ}}(T_{\text{К}} - T_{\text{В}}); \Delta i_{\text{К}} = c_{\text{рВ}}(T_{\text{К}} - T_{\text{В}}); \Delta s_{\text{К}} = 0; q_{\text{К}} = 0.$$

Работа, подводимая к валу ротора компрессора: $L_{\text{К}} = c_{\text{рВ}}(T_{\text{К}}^* - T_{\text{В}}^*);$

в) камера сгорания

$$\Delta u_{\text{КС}} = c_{\text{VГ}}(T_{\text{Г}} - T_{\text{К}}); \Delta i_{\text{КС}} = c_{\text{рГ}}(T_{\text{Г}} - T_{\text{К}}); \Delta s_{\text{КС}} = c_{\text{рГ}} \ln\left(\frac{T_{\text{Г}}}{T_{\text{К}}}\right).$$

Количество теплоты, подводимое к воздуху в камере сгорания

$$q_{\text{КС}} = c_{\text{рГ}}(T_{\text{Г}}^* - T_{\text{К}}^*);$$

г) турбина

$$\Delta u_{\text{Т}} = c_{\text{VГ}}(T_{\text{Г}} - T_{\text{Т}}); \Delta i_{\text{Т}} = c_{\text{рГ}}(T_{\text{Г}} - T_{\text{Т}}); \Delta s_{\text{Т}} = 0; q_{\text{Т}} = 0.$$

Работа на валу турбины: $L_{\text{Т}} = c_{\text{рГ}}(T_{\text{Г}}^* - T_{\text{Т}}^*);$

д) выходное устройство

$$\Delta u_{\text{РС}} = c_{\text{VГ}}(T_{\text{Т}} - T_{\text{С}}); \Delta i_{\text{РС}} = c_{\text{рГ}}(T_{\text{Т}} - T_{\text{С}}); \Delta s_{\text{РС}} = 0; q_{\text{РС}} = 0.$$

Работа расширения в реактивном сопле: $L_{\text{РС}} = c_{\text{рГ}}(T_{\text{Т}}^* - T_{\text{С}}).$

Полезная энергия, которой располагает двигатель, как тепловая машина, представляет собой разность работ расширения газа и сжатия воздуха:

$$L_{\text{Ц}} = c_{\text{рВ}} T_{\text{Н}} (\varepsilon - 1) \left(\frac{\Delta}{\varepsilon} - 1 \right),$$

где $\varepsilon = \pi^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$; $\pi = \frac{p_{\text{К}}^*}{p_{\text{Н}}}$ - общая степень повышения давления воздуха в двигателе.

ТРД можно рассматривать также как движитель, в котором полезная энергия преобразуется в приращение кинетической энергии газового потока:

$$L_{\text{Ц}} = \frac{c_{\text{с}}^2 - v^2}{2}$$

Порядок выполнения задания

1. В соответствии с заданием определить параметры состояния в контрольных сечениях газоздушного тракта ТРД.

2. Выполнить расчет энергетических показателей процессов в компрессоре, камере сгорания, в турбине и в двигателе в целом.

3. Проанализировать влияние параметров рабочего процесса на тягу и КПД турбореактивного двигателя.

Отчет по лабораторной работе

Включает:

1. Значения параметров состояния рабочего тела в контрольных сечениях проточной части ТРД.

2. Энергетические показатели процессов.

3. Ответы на контрольные вопросы:

- принцип действия ГТД и ТРД;

- напишите и поясните систему уравнений движения газа, которая использовалась в данной работе;

- поясните, как представляется Вам зависимость удельной тяги $P_{уд} = c_c \cdot V$ от параметров рабочего процесса ТРД.

ЛР-3 ИССЛЕДОВАНИЕ ЦИКЛОВ ТЕПЛОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ (4 часа)

- Цель работы:**
1. Исследование циклов Карно, Брайтона, Отто, Дизеля.
 2. Сравнение эффективности циклов тепловых двигателей.
 3. Сделать выводы, ответить на контрольные вопросы и оформить отчет по лабораторной работе.

Задание на работу

1. Принимаются следующие начальные условия:
 $T_1=288\text{K}$; $p_1=101325\text{Н/м}^2$; $R=287\text{Дж/(кг К)}$; $k=1,4$.
2. Степень повышения давления в адиабатных процессах сжатия 1-2 цикла Брайтона ($\pi=p_2/p_1=20$); степень сжатия в тех же процессах сжатия циклов Отто ($\varepsilon = \frac{v_1}{v_2}$) и Дизеля ($\varepsilon = 20$).
3. Для всех циклов количество подводимой теплоты к рабочему телу (воздуху) $q_1=1000\text{кДж/кг}$.
4. Необходимо выполнить:
 - определение параметров состояния в контрольных точках циклов Брайтона, Отто и Дизеля;
 - найти работу цикла $L_{\text{ц}}$ и термический КПД η_t ;
 - сравнить эффективность каждого из перечисленных циклов между собой (по отношению к термическому КПД цикла Карно $\eta_{\text{т карно}}$);
 - изобразить каждый из циклов в рабочей тетради в p - v и T - s координатах.
5. Для сокращения времени на выполнение необходимых расчётов подгруппа студентов может быть разделена по заданным циклам (2 – 3 чел. на цикл).

Основные сведения

Циклом называют последовательность термодинамических процессов, в результате совершения которых рабочее тело возвращается в исходное состояние.

Цикл Брайтона реализуется в авиационных газотурбинных двигателях (открытая термодинамическая система – поток рабочего тела (воздуха)). Он состоит из двух адиабатных и двух изобарных процессов (рис. 3.1).

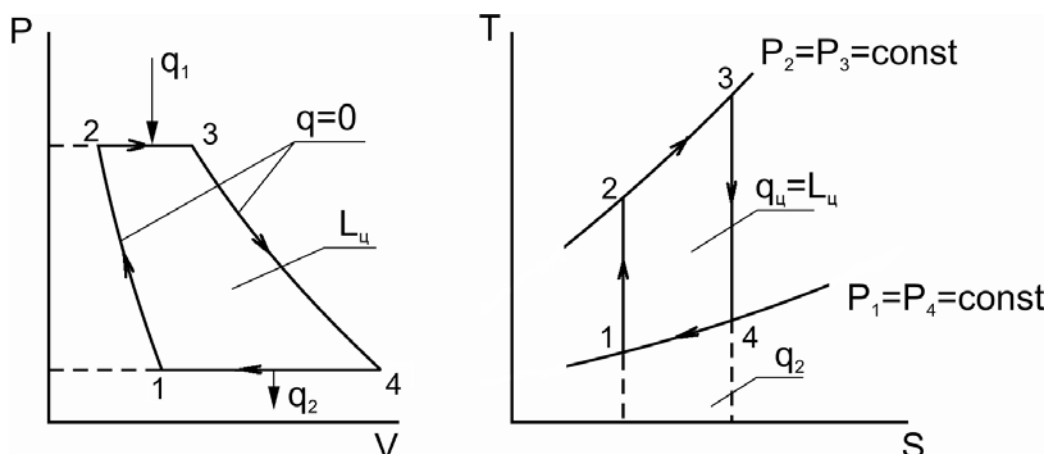


Рис. 3.1. Цикл Брайтона в p - v и T - s координатах

Исходные данные для расчета цикла Брайтона:

параметры состояния в исходной **точке «1»** (начало цикла) p_1, T_1, v_1 ;

степень повышения давления $\pi = \frac{p_2}{p_1}$;

степень подогрева рабочего тела в цикле $\Delta = \frac{T_3}{T_1}$;

показатель адиабаты и газовая постоянная k, R .

1. Расчет параметров состояния в контрольных точках цикла Отто производится в следующей последовательности:

1–2: $pv^k = const$ (адиабатный процесс сжатия)

Точка «2»:

$$p_2 = p_1 \pi; T_2 = T_1 \pi^{\frac{k-1}{k}}; v_2 = \frac{RT_2}{p_2} = \frac{RT_1 \pi^{\frac{k-1}{k}}}{p_1 \pi} = v_1 \pi^{-\frac{1}{k}};$$

2–3: $p = const$ (изобарный процесс подвода теплоты)

Точка «3»:

$$T_3 = T_1 \Delta; p_3 = p_2 = p_1 \pi; v_3 = \frac{RT_3}{p_3} = \frac{RT_1 \Delta}{p_1 \pi} = v_1 \frac{\Delta}{\pi};$$

3–4: $pv^k = const$ (адиабатный процесс расширения)

Точка «4»:

$$T_4 = T_1 \frac{\Delta}{\pi^{\frac{k-1}{k}}}; p_4 = p_1; v_4 = \frac{RT_4}{p_4} = \frac{RT_1}{p_1} \frac{\Delta}{\pi^{\frac{k-1}{k}}} = v_1 \frac{\Delta}{\pi^{\frac{k-1}{k}}};$$

2. Расчёт энергий, участвующих в термодинамических процессах цикла Брайтона:

$$L_{p12} = \frac{\kappa RT_1}{k-1} \left(\pi^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right) \text{ (техническая работа сжатия);}$$

$$L_{p34} = \frac{\kappa RT_3}{k-1} \left[1 - \left(\frac{p_4}{p_3} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] = \frac{\kappa RT_1 \Delta}{k-1} \left[1 - \left(\frac{1}{\pi} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \text{ (техническая работа расширения);}$$

$$q_1 = c_p (T_3 - T_2) = c_p T_1 (\Delta - \pi^{\frac{k-1}{k}}) \text{ (количество теплоты, подведенное к рабочему телу в изобарном процессе «2 – 3»);}$$

$$q_2 = c_p (T_4 - T_1) = c_p T_1 \left(1 - \frac{\Delta}{\pi^{\frac{k-1}{k}}} \right) \text{ (количество теплоты, отведенное от}$$

рабочего тела во внешнюю среду в изобарном процессе «4 - 1»);

$$L_{ц} = L_{расш} - L_{сж} = L_{p34} - L_{p12} = \frac{\kappa RT_1}{k-1} (\pi^{\frac{k-1}{k}} - 1) \left(\frac{\Delta}{\pi^{\frac{k-1}{k}}} - 1 \right) \text{ (полезная}$$

работа цикла Брайтона);

$$\eta_t = \frac{L_{ц}}{q_1} = 1 - \frac{1}{\pi^{\frac{k-1}{k}}}; \text{ (термический КПД цикла Брайтона).}$$

В 1876 году немецкий конструктор **Август Николаус Отто** (1832 – 1891) создал поршневой четырехтактный бензиновый двигатель внутреннего сгорания (**закрытая термодинамическая система**), работающий по циклу, состоящему из двух адиабатных и двух изохорных процессов (рис.3.2).

Особенности цикла Отто:

а) рабочее тело представляет собой топливовоздушную смесь (бензин + воздух);

б) бензины для авиационных и автомобильных двигателей представляют собой смеси углеводородов, которые выкипают при нагреве нефти до 40...200°C. В Российской Федерации производят бензины марок А-74, АИ-93, АИ-95, АИ-98, а также бензины с улучшенными экологическими свойствами. Цифры в марке бензина характеризуют его **антидетонационные свойства**, которые оценивают **октановым числом** (ОЧ). Оно численно равно процентному содержанию в смеси изооктана с ОЧ=100 и Н – гептана с ОЧ=0, которая имеет такую же детонационную стойкость, как и испытуемый бензин. Октановое число оценивают по моторному методу в единицах ОЧМ и по исследовательскому методу в

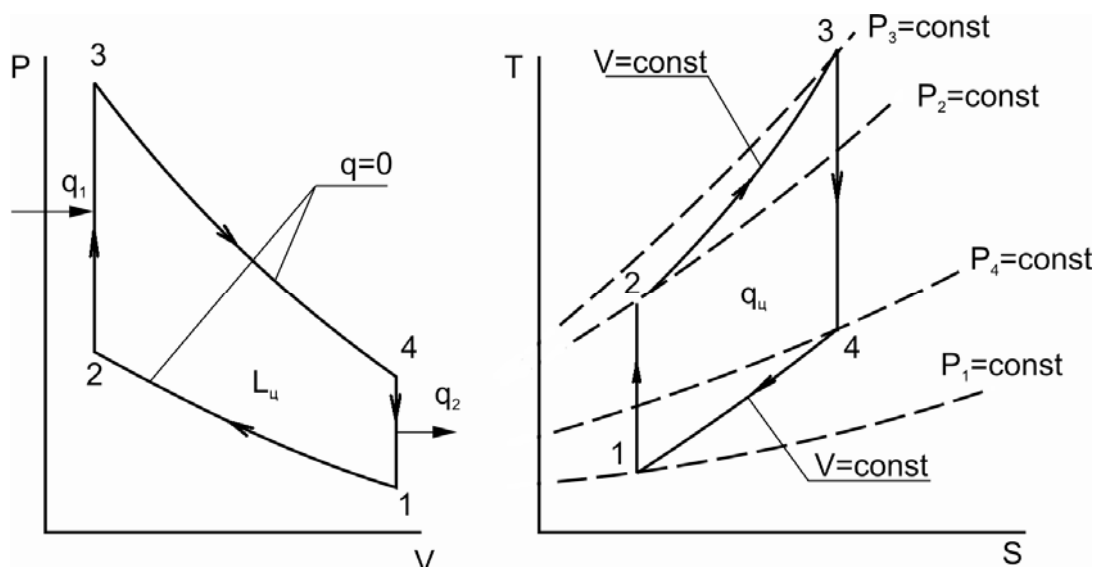


Рис. 3.2. Цикл Отто в p - v и T - s координатах

единицах ОЧИ. ОЧИ >ОЧМ на 8...12 единиц. Эту разницу называют чувствительностью бензинов к октановому числу;

в) при сжатии этой смеси температура рабочего тела возрастает и может превысить температуру самовоспламенения топлива. В этом случае в процессе сжатия возникает пламя и резко увеличивается давление на поршень. Явление называют детонацией двигателя.

Для того, чтобы увеличить температуру самовоспламенения топлива, в него добавляют октан $CH_3(CH_2)_6CH_3$ (бесцветная жидкость, температура кипения $125.7^\circ C$, имеет детонационную способность (октановое число 17...19)). Октановое число наиболее распространенных отечественных марок автомобильных бензинов 76...89, авиабензинов 91...95.

Исходные данные для расчета цикла Отто:

параметры состояния в исходной **точке «1»** (начало цикла) p_1, T_1, v_1 ;

степень сжатия $\varepsilon = \frac{p_2}{p_1} = \frac{v_1}{v_2}$ или степень повышения давления

$$\pi = \frac{p_2}{p_1} = \varepsilon^k;$$

степень подогрева рабочего тела в цикле $\Delta = \frac{T_3}{T_1}$;

показатель адиабаты и газовая постоянная k, R .

1. Расчет параметров состояния в контрольных точках цикла Отто производится в следующей последовательности:

1-2: $pv^k = const$ (адиабатный процесс сжатия)

Точка «2»:

$$p_2 = p_1 \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^k = p_1 \varepsilon^k; T_2 = T_1 \varepsilon^{k-1}; v_2 = \frac{v_1}{\varepsilon};$$

2-3; $v = const$ (изохорный процесс подвода теплоты)

Точка «3»:

$$v_3 = v_2 = \frac{v_1}{\varepsilon}; T_3 = T_1 \Delta; p_3 = \frac{RT_3}{v_3} = \frac{RT_1 \Delta \varepsilon}{v_1};$$

3-4: $pv^k = const$ (адиабатный процесс расширения)

Точка «4»:

$$v_4 = v_1; T_4 = \frac{T_3}{\varepsilon^{k-1}} = T_1 \frac{\Delta}{\varepsilon^{k-1}}; p_4 = \frac{RT_4}{v_4} = p_1 \frac{\Delta}{\varepsilon^{k-1}};$$

2. Расчёт энергий, участвующих в термодинамических процессах цикла Отто:

$$L_{v12} = \frac{RT_1}{k-1} \left(\varepsilon^{k-1} - 1 \right) \text{ (деформационная работа сжатия);}$$

$$L_{v34} = \frac{RT_3}{k-1} \left[1 - \left(\frac{v_3}{v_4} \right)^{k-1} \right] = \frac{RT_1 \Delta}{k-1} \left[1 - \left(\frac{1}{\varepsilon} \right)^{k-1} \right] \text{ (деформационная работа расширения);}$$

$$q_1 = c_v (T_3 - T_2) = c_v T_1 (\Delta - \varepsilon^{k-1}) \text{ (количество теплоты, подведенное к рабочему телу в изохорном процессе «2 - 3»);}$$

$$q_2 = c_v (T_1 - T_4) = c_v T_1 \left(1 - \frac{\Delta}{\varepsilon^{k-1}} \right) \text{ (количество теплоты, отведенное от рабочего тела во внешнюю среду в изохорном процессе «4 - 1»);}$$

$$L_{\text{ц}} = L_{\text{расш}} - L_{\text{сж}} = L_{v34} - L_{v12} = \frac{RT_1}{k-1} (\varepsilon^{k-1} - 1) \left(\frac{\Delta}{\varepsilon^{k-1}} - 1 \right) \text{ (полезная работа цикла Отто);}$$

$$\eta_t = \frac{L_{\text{ц}}}{q_1} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \text{ (термический КПД цикла Отто).}$$

В 1897 году немецкий инженер **Рудольф Дизель** (1858 – 1913) создал поршневой двигатель внутреннего сгорания с воспламенением от сжатия (закрытая термодинамическая система). Двигатель работает на дизельном топливе (керосино-газойлевые фракции прямой перегонки нефти (для

быстроходных дизелей) или остаточные нефтепродукты (для тихоходных дизелей).

Для характеристики дизельного топлива применяется цетановое число – условная количественная характеристика воспламенительных свойств дизельного топлива. Численно равно процентному (по объёму) содержанию цетана (гексадекан $CH_4[CH_2]_{14}CH_3$ - бесцветная жидкость, температура воспламенения $285^\circ C$, цетановое число которого принято за 100 %) в смеси с метилнафталином (цетановое число которого равно нулю), эквивалентной по воспламенительным свойствам испытываемому топливу при стандартных условиях испытания.

Цикл Дизеля состоит из двух адиабатных процессов, изобарного процесса подвода тепла и изохорного процесса отвода тепла (рис.3.3).

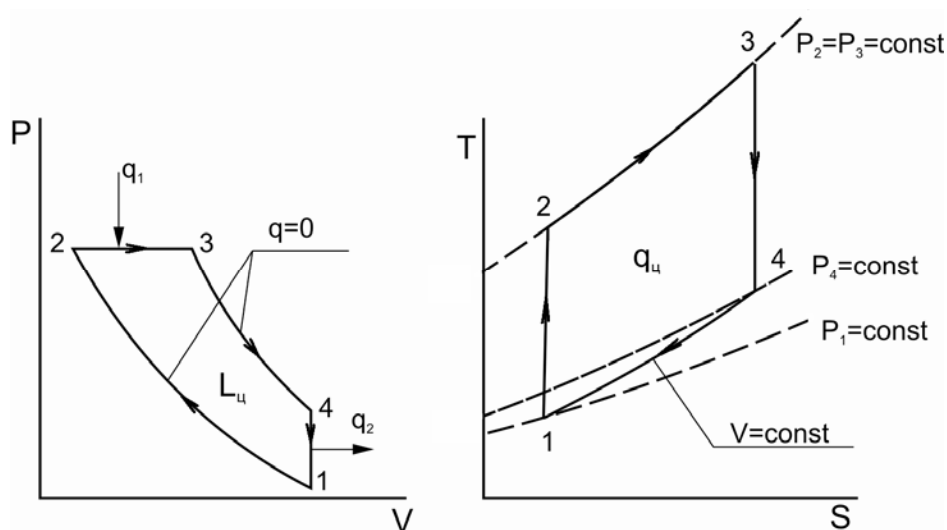


Рис. 3.3. Цикл Дизеля в p - v и T - s координатах

Исходными данными для расчёта цикла Дизеля являются:

параметры состояния в исходной **точке «1»** (начало цикла) p_1, T_1, v_1 ;

степень сжатия $\varepsilon = \frac{v_1}{v_2}$ (или степень повышения давления $\pi = \frac{p_2}{p_1}$);

степень подогрева рабочего тела в цикле $\Delta = \frac{T_3}{T_1}$;

показатель адиабаты и газовая постоянная k, R .

1. Порядок расчета параметров состояния в контрольных точках цикла Дизеля следующий:

1-2: $pv^k = const$ (адиабатный процесс сжатия)

Точка «2»:

$$p_2 = p_1 \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^k = p_1 \varepsilon^k; T_2 = T_1 \varepsilon^{k-1}; v_2 = \frac{v_1}{\varepsilon};$$

2-3; $p = const$; (изобарный процесс подвода теплоты q_1)

Точка «3»:

$$p_3 = p_2 = p_1 \varepsilon^k; T_3 = T_1 \Delta; v_3 = \frac{RT_3}{p_3} = v_1 \frac{\Delta}{\varepsilon^k};$$

3-4: $pv^k = const$; (адиабатный процесс расширения)

Точка «4»:

$$v_4 = v_1; p_4 = p_3 \left(\frac{v_3}{v_4}\right)^k = p_1 \varepsilon^k \left(\frac{v_1 \frac{\Delta}{\varepsilon^k}}{v_1}\right)^k = p_1 \frac{\Delta^k}{\varepsilon^{k(k-1)}};$$

$$T_4 = \frac{p_4 v_4}{R} = T_1 \frac{\Delta^k}{\varepsilon^{k(k-1)}};$$

2. Расчет энергий, участвующих в процессах цикла Дизеля, следующий:

Работа сжатия в цикле Дизеля

$$L_{сж} = L_{v12} = \frac{RT_1}{k-1} \left(\varepsilon^{k-1} - 1 \right) \text{ (деформационная работа сжатия).}$$

Работа расширения в цикле Дизеля

$$L_{расш} = L_{v23} + L_{v34},$$

где

$$L_{v34} = \frac{RT_3}{k-1} \left[1 - \left(\frac{v_3}{v_4}\right)^{k-1} \right] = \frac{RT_1 \Delta}{k-1} \left[1 - \frac{\Delta^{k-1}}{\varepsilon^{k(k-1)}} \right] \text{ (деформационная работа расширения);}$$

$$L_{v23} = p_2 (v_3 - v_2) = R(T_3 - T_2) = RT_1 (\Delta - \varepsilon^{k-1}) \text{ (деформационная работа расширения).}$$

Количество теплоты, подведенное к рабочему телу в цикле Дизеля

$$q_1 = c_p (T_3 - T_2) = \frac{kRT_1}{k-1} (\Delta - \varepsilon^{k-1}); \text{ (подведенное количество теплоты к рабочему телу);}$$

Количество теплоты, отведенное от рабочего тела в цикле Дизеля

$$q_2 = c_v (T_4 - T_1) = \frac{RT_1}{k-1} \left[\frac{\Delta^k}{\varepsilon^{k(k-1)}} - 1 \right] \text{ (отведенное количество теплоты от рабочего тела в цикле Дизеля);}$$

Полезная работа цикла Дизеля:

$$\begin{aligned} L_{ц} &= L_{расш} - L_{сж} = RT_1 (\Delta - \varepsilon^{k-1}) + \frac{RT_1 \Delta}{k-1} \left[1 - \frac{\Delta^{k-1}}{\varepsilon^{k(k-1)}} \right] - \frac{RT_1}{k-1} (\varepsilon^{k-1} - 1) = \\ &= \frac{RT_1}{k-1} \left[k(\Delta - \varepsilon^{k-1}) - \frac{\Delta^k}{\varepsilon^{k(k-1)}} + 1 \right] \end{aligned}$$

Термический КПД цикла Дизеля

$$\eta_t = \frac{L_{ц}}{q_{23}} = \frac{k(\Delta - \varepsilon^{k-1}) + 1 - \frac{\Delta^k}{\varepsilon^{k(k-1)}}}{k(\Delta - \varepsilon^{k-1})} = 1 - \frac{\frac{\Delta^k}{\varepsilon^{k(k-1)}} - 1}{\kappa(\Delta - \varepsilon^{k-1})};$$

Базовым циклом для всех тепловых двигателей является цикл, который впервые в 1824 году предложил французский физик и инженер **Карно Никола Леонар Сади** (1796 – 1832). Этот цикл состоит из двух адиабатических и двух изотермических процессов (рис.3.4).

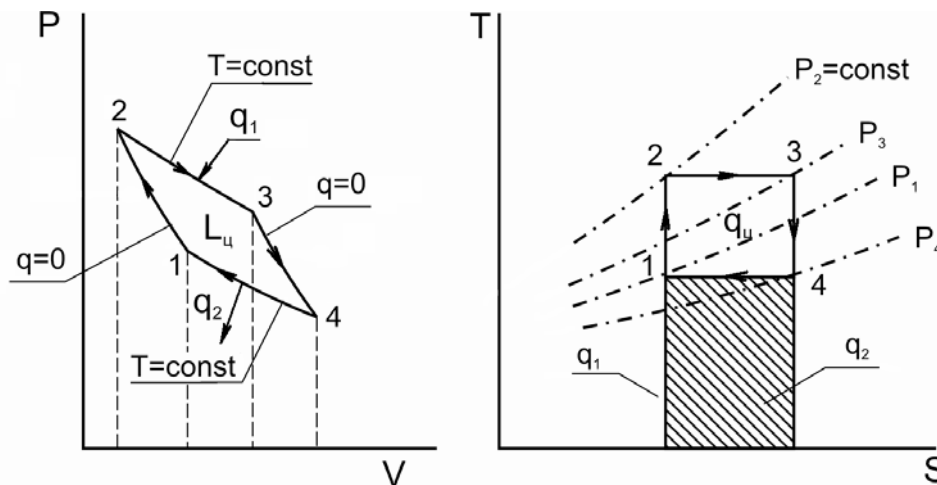


Рис. 3.4. Цикл Карно в p - v и T - s координатах

Исходные данные:

- параметры состояния **точки «1»** (начало цикла): T_1, p_1, v_1 ;
- степень сжатия в адиабатном процессе «1 – 2» $\varepsilon = \frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{v_1}{v_2}$;
- удельное количество теплоты, подводимое к рабочему телу в изотермическом процессе «2 – 3» q_1 ;
- показатель адиабаты и газовая постоянная рабочего тела k, R .

1. Расчет параметров состояния в контрольных точках цикла Карно производится в следующей последовательности:

Точка «2»:

$$p_2 = p_1 \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^k = p_1 \varepsilon^k; T_2 = T_1 \varepsilon^{k-1}; v_2 = \frac{v_1}{\varepsilon};$$

Точка «3»:

$$T_3 = T_2 = T_1 \varepsilon^{k-1}; v_3 = v_2 e^{\frac{q_1}{RT_2}} = \frac{v_1}{\varepsilon} e^{\frac{q_1}{RT_1 \varepsilon^{k-1}}};$$

$$p_3 = \frac{RT_3}{v_3} = \frac{RT_1 \varepsilon^{k-1} \varepsilon}{v_1 e^{RT_1 \varepsilon^{k-1}}} = p_1 \frac{\varepsilon^k}{e^{RT_1 \varepsilon^{k-1}}};$$

Точка «4»:

$$T_4 = T_1; v_4 = v_3 \left(\frac{T_3}{T_4} \right)^{\frac{1}{k-1}} = v_3 \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{1}{k-1}} = v_3 \varepsilon = v_1 e^{\frac{q_1}{RT_1 \varepsilon^{k-1}}};$$

$$p_4 = \frac{RT_4}{v_4} = \frac{RT_1}{v_1 e^{RT_1 \varepsilon^{k-1}}} = \frac{p_1}{e^{RT_1 \varepsilon^{k-1}}};$$

2. Далее производится расчёт энергий, участвующих в термодинамических процессах цикла Карно:

«1 – 2» - адиабатический процесс сжатия

$$L_{v12} = \frac{RT_1}{k-1} \left(\varepsilon^{k-1} - 1 \right); \text{ (деформационная работа сжатия)}$$

«2 – 3» - изотермический процесс расширения

$$L_{v23} = RT_1 \varepsilon^{k-1} \ln \frac{v_3}{v_2} = RT_1 \varepsilon^{k-1} \ln \frac{v_1}{\varepsilon} e^{\frac{q_1}{RT_1 \varepsilon^{k-1}}} \frac{\varepsilon}{v_1} = q_1; \text{ (деформационная работа расширения)}$$

«3 – 4» - адиабатический процесс расширения

$$\begin{aligned} L_{v34} &= \frac{RT_3}{k-1} \left[1 - \left(\frac{p_4}{p_3} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] = \\ &= \frac{RT_1 \varepsilon^{k-1}}{k-1} \left[1 - \left(\frac{\frac{p_1 e^{\frac{q_1}{RT_1 \varepsilon^{k-1}}}}{v_1 e^{RT_1 \varepsilon^{k-1}}}}{\frac{p_1 \varepsilon^k}{v_1 e^{RT_1 \varepsilon^{k-1}}}} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] = \frac{RT_1 \varepsilon^{k-1}}{k-1} \left(1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \right); \end{aligned}$$

(деформационная работа расширения)

«4 – 1» - изотермический процесс сжатия

$$L_{v41} = RT_1 \ln \frac{v_4}{v_1} = \frac{q_1}{\varepsilon^{k-1}}; \text{ (деформационная работа сжатия)}$$

Работа цикла или **свободная энергия на выходе из тепловой машины** представляет собой алгебраическую сумму деформационных работ цикла Карно или **разность деформационных работ расширения и сжатия**:

$$L_{ц} = L_{расш} - L_{сж} = (L_{v34} + L_{v23}) - (L_{v12} + L_{v41}) = \\ = \left[\frac{RT_1 \varepsilon^{k-1}}{k-1} \left(1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \right) + q_1 \right] - \left[\frac{RT_1}{k-1} (\varepsilon^{k-1} - 1) + \frac{q_1}{\varepsilon^{k-1}} \right] = q_1 \left(1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \right)$$

Эффективность цикла Карно оценивается по величине **термического коэффициента полезного действия (КПД)**, определяемого **отношением полезной работы цикла $L_{ц}$ к подведенной теплоте q_1** :

$$\eta_t = \frac{L_{ц}}{q_1} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}}$$

Рассмотрим теперь тепловую диаграмму T, S (рис.3.4). Термический КПД цикла Карно можно представить так:

$$\eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1},$$

где q_1 - теплота, подведенная к рабочему телу в изотермическом процессе расширения;

q_2 - теплота, отведенная от рабочего тела в изотермическом процессе сжатия «4 – 1».

В изотермических процессах теплота равна работе процесса, то есть

$$q_1 = RT_3 \ln \frac{v_3}{v_2} = RT_3 \ln \frac{p_2}{p_3}; \quad q_2 = RT_1 \ln \frac{v_4}{v_1} = RT_1 \ln \frac{p_1}{p_4}$$

С другой стороны, для адиабатных процессов «1 – 2» и «3 – 4» справедливы зависимости:

$$\frac{v_4}{v_3} = \left(\frac{T_3}{T_1} \right)^{\frac{1}{k-1}}; \quad \frac{v_1}{v_2} = \left(\frac{T_3}{T_1} \right)^{\frac{1}{k-1}}; \quad \text{Отсюда } \frac{v_4}{v_3} = \frac{v_1}{v_2} \text{ или } \frac{v_4}{v_1} = \frac{v_3}{v_2}$$

Полезно использованная теплота $q_{ц}$ в T, S диаграмме представляет собой разность подведенной и отведенной теплот, то есть

$$q_{ц} = q_1 - q_2$$

На рис.3.4 эта теплота численно равна работе цикла и находится по формуле:

$$q_{ц} = RT_3 \ln \frac{v_3}{v_2} - RT_1 \ln \frac{v_3}{v_2} = \ln \frac{v_3}{v_2} R(T_3 - T_1)$$

Термический КПД цикла равен отношению полезной теплоты, к подведенной, то есть

$$\eta_t = \frac{q_{ц}}{q_1} = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{T_1}{T_3}$$

Из полученного выражения для термического КПД цикла Карно следует:

- 1) термический КПД определяется лишь интервалом температур, в котором цикл осуществляется;
- 2) чем ближе значения T_3 и T_1 , тем меньше термический КПД;
- 3) термический КПД не может быть равен единице, так как неосуществимо ни $T_1 = 0$, ни $T_3 = \infty$;
- 4) при отсутствии тел с разной температурой ($T_3 - T_1$) невозможно осуществить периодическое преобразование теплоты в работу;
- 5) любой произвольный цикл, осуществленный в том же интервале температур T_3 и T_1 , имеет меньший термический КПД, чем КПД цикла Карно. Это означает, что работа произвольного цикла оказывается меньше таковой для цикла Карно. Поэтому цикл Карно является базовым для всех произвольных циклов, а отношение термического КПД произвольного цикла к термическому КПД цикла Карно (в том же интервале температур) является показателем термодинамического совершенства произвольного цикла.

Порядок выполнения задания

1. Используя алгоритмы определения параметров состояния и энергетических показателей, рассчитать циклы Брайтона, Отто, Дизеля и базового цикла Карно.
2. Для всех циклов найти полезную работу цикла и термический КПД.
3. Выполнить сравнительный анализ циклов Отто, Дизеля, Брайтона и Карно при заданных исходных данных.

Отчетность по лабораторной работе

Включает:

1. Результаты расчетов параметров состояния в контрольных точках циклов.
2. Значения работы цикла и термического КПД для каждого из заданных циклов.
3. Ответы на контрольные вопросы:
 - а) напишите и поясните формулы, описывающие процессы в циклах Карно, Брайтона, Отто и Дизеля;
 - б) выполните анализ значений работы $L_{ц}$ в различных циклах;
 - в) покажите в диаграммах $p-v$ и $T-s$ площади фигур, соответствующие деформационным и техническим работам, а также теплотам, участвующим в процессах.

ЛР-4 НОВЫЕ ЦИКЛЫ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ (4 часа)

- Цель работы:**
1. Ознакомление с более экономичными циклами тепловых двигателей.
 2. Выбор и обоснование цикла с утилизацией теплоты выхлопных газов.
 3. Отчёт о лабораторной работе.

Задание на работу

1. Определить экономию топлива в авиационных двигателях, работающих по циклам Брайтона, Дизеля и Отто.

2. Рассчитать энергетические показатели циклов с утилизацией теплоты выхлопных газов.

3. Исходные данные:

- степень сжатия в циклах:

а) Отто $\varepsilon = \frac{v_1}{v_2} = 10$; б) Дизеля ($\varepsilon = 20$);

- степень повышения давления в цикле Брайтона ($\pi = \frac{p_2}{p_1} = 7$);

- степень подогрева в цикле Отто ($\Delta = \frac{T_3}{T_1} = 8$), в циклах Дизеля

и Брайтона ($\Delta = 6$):

- параметры рабочего тела – воздуха в начале циклов (**в точке «1»**):

$$T_1 = 288\text{K}, p_1 = 101325 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}; v_1 = \frac{RT_1}{p_1} = \frac{287 \cdot 288}{101325} = 0.816 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}};$$

- степень регенерации в цикле Брайтона $\sigma_p = \frac{T_3 - T_2}{T_4 - T_2} = 0.7$;

- показатель адиабаты и газовая постоянная $k = 1.4, R = 287 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$.

Основные сведения

Решение проблемы экономии топлива в гражданской авиации связано с усовершенствованием термодинамических циклов поршневых и газотурбинных двигателей.

В закрытых термодинамических системах (циклах Отто и Дизеля) усовершенствование циклов связано с утилизацией теплоты выхлопных газов. Для этого предлагается установить турбоагрегат (турбокомпрессор) в точке «4», турбина которого использует потенциальную энергию выхлопных газов, а компрессор, привод которого

осуществляется от этой турбины производит предварительное сжатие воздуха перед подачей его либо в карбюратор для приготовления топливоздушной смеси (в цикле Отто), либо непосредственно в цилиндр (в цикле Дизеля) (рис.4.1).

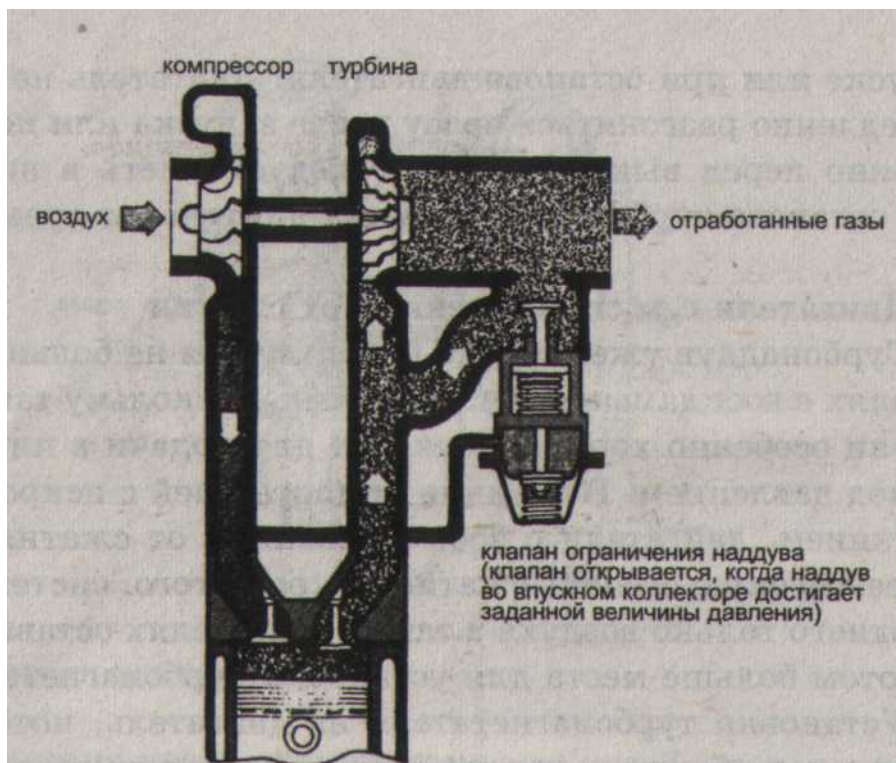


Рис.4.1. Турбоагнетатель с клапаном ограничения наддува воздуха в цилиндр двигателя

В открытых термодинамических системах (в цикле Брайтона) для утилизации теплоты выхлопных газов используется теплообменный аппарат, в котором за счет теплоты выхлопных газов происходит подогрев воздуха, поступающего в аппарат из-за компрессора, перед подачей его в камеру сгорания (тратится меньше топлива на подогрев этого воздуха) (рис.4.2).

Рассмотрим цикл Отто с утилизацией выхлопных газов (рис.4.3). Такой цикл предложен Гемфри. Расчет параметров состояния и энергий, участвующих в процессах цикла Гемфри производится в следующей последовательности:

1. Задано: p_1, T_1, v_1 и ε, Δ

$1-2$: $pv^k = const$; (адиабатный процесс сжатия)

Точка «2»:

$$p_2 = p_1 \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^k = p_1 \varepsilon^k; T_2 = T_1 \varepsilon^{k-1}; v_2 = \frac{v_1}{\varepsilon};$$

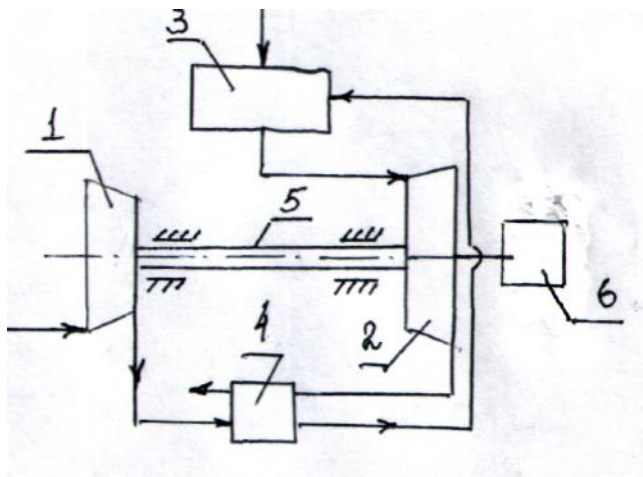


Рис.4.2. Принципиальная схема газотурбинного двигателя с регенерацией теплоты:

- 1 – компрессор; 2 – турбина; 3 – камера сгорания;
4 – теплообменный аппарат; 5 – вал турбокомпрессора;
6 – потребитель

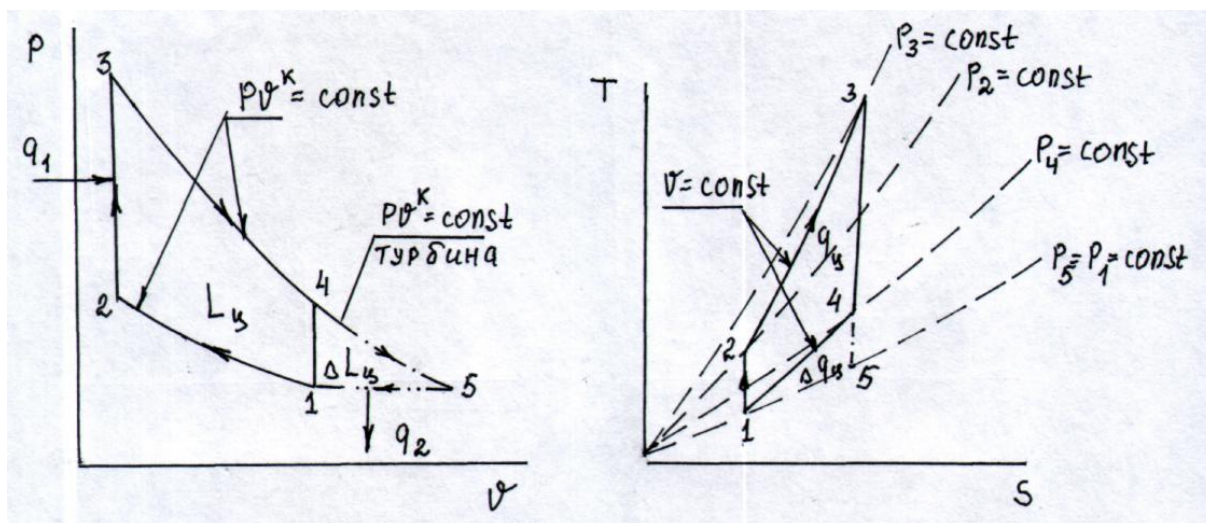


Рис.4.3. Цикл Отто с утилизацией теплоты выхлопных газов в p, v и T, S – координатах

2–3; $v = const$; (изохорный подвод теплоты в камере сгорания)

Точка «3»:

$$v_3 = v_2 = \frac{v_1}{\varepsilon}; T_3 = T_1 \Delta; p_3 = \frac{RT_3}{v_3} = \frac{RT_1 \Delta \varepsilon}{v_1} = p_1 \Delta \varepsilon;$$

3–4: $pv^k = const$; (адиабатный процесс расширения)

Точка «4»:

$$v_4 = v_1; T_4 = \frac{T_1 \Delta}{\varepsilon^{k-1}}; p_4 = \frac{RT_4}{v_4} = p_1 \frac{\Delta}{\varepsilon^{k-1}};$$

4-5; $pv^k = const$; (адиабатный процесс расширения выхлопных газов в турбине)

Точка «5»:

$$p_5 = p_1; v_5 = v_4 \left(\frac{p_4}{p_5}\right)^{\frac{1}{k}} = v_1 \frac{\Delta^{\frac{1}{k}}}{\varepsilon^{\frac{k-1}{k}}}; T_5 = \frac{p_5 v_5}{R} = T_1 \frac{\Delta^{\frac{1}{k}}}{\varepsilon^{\frac{k-1}{k}}};$$

2. Энергетические показатели цикла Отто с утилизацией теплоты:

2.1. Работа сжатия:

$$L_{сж} = L_{v12} + L_{v51} =$$

$$= \frac{RT_1}{k-1} (\varepsilon^{k-1} - 1) + p_1 (v_5 - v_1) = \frac{RT_1}{k-1} (\varepsilon^{k-1} - 1) + RT_1 \left(\frac{\Delta^{\frac{1}{k}}}{\varepsilon^{\frac{k-1}{k}}} - 1 \right)$$

2.2. Работа расширения

$$L_{расш} = L_{v35} = \frac{RT_1 \Delta}{k-1} \left[1 - \left(\frac{p_5}{p_3} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] = \frac{RT_1 \Delta}{k-1} \left[1 - \left(\frac{1}{\Delta \varepsilon} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]$$

2.3. Работа цикла

$$L_{ц} = L_{расш} - L_{сж} =$$

$$= \frac{RT_1 \Delta}{k-1} \left[1 - \left(\frac{1}{\Delta \varepsilon} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] - \frac{RT_1}{k-1} (\varepsilon^{k-1} - 1) - RT_1 \left(\frac{\Delta^{\frac{1}{k}}}{\varepsilon^{\frac{k-1}{k}}} - 1 \right) =$$

$$= \frac{RT_1}{k-1} \left(\Delta - \varepsilon^{k-1} - k \frac{\Delta^{\frac{1}{k}}}{\varepsilon^{\frac{k-1}{k}}} + k \right)$$

2.4. Количество теплоты, подведенное к рабочему телу

$$q_1 = c_v (T_3 - T_2) = \frac{RT_1}{k-1} (\Delta - \varepsilon^{k-1})$$

2.5. Термический КПД цикла Отто с утилизацией теплоты

$$\eta_t = \frac{L_{ц}}{q_1} = 1 - \frac{k \left(\frac{\Delta^{\frac{1}{k}}}{\varepsilon^{\frac{k-1}{k}}} - 1 \right)}{\Delta - \varepsilon^{k-1}}$$

2.6. Относительное увеличение работы цикла Гемфри по сравнению с циклом Отто (без утилизации теплоты):

$$\bar{L}_\eta = \frac{\frac{1}{\Delta - \frac{k\Delta^k}{k-1} + k - \varepsilon^{k-1}}}{\frac{\varepsilon^k}{\Delta - \frac{\Delta}{\varepsilon^{k-1}} - \varepsilon^{k-1} + 1}};$$

На рис.4.4 показан цикл Дизеля с утилизацией теплоты выхлопных газов путём установки на выходе из двигателя турбокомпрессора.

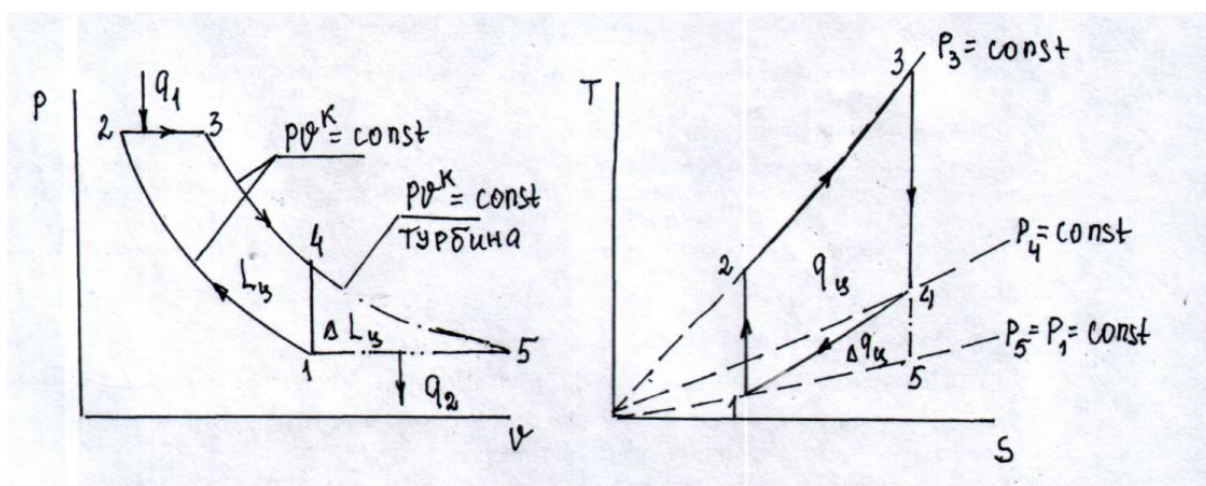


Рис.4.4. Цикл Дизеля с утилизацией теплоты в p, v и T, S – координатах

Расчет параметров состояния и энергий, участвующих в термодинамических процессах цикла Дизеля с утилизацией теплоты выхлопных газов производится в следующей последовательности:

1. **Задано:** p_1, v_1, T_1 и $\varepsilon, \Delta, p_5 = p_1$

1-2: $pv^k = const$; (адиабатный процесс сжатия)

Точка «2»:

$$p_2 = p_1 \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^k = p_1 \varepsilon^k; T_2 = T_1 \varepsilon^{k-1}; v_2 = \frac{v_1}{\varepsilon};$$

2-3; $p = const$; (изобарный подвод теплоты к рабочему телу в камере сгорания)

Точка «3»:

$$p_3 = p_2 = p_1 \varepsilon^k; T_3 = T_1 \Delta; v_3 = \frac{RT_3}{p_3} = v_1 \frac{\Delta}{\varepsilon^k};$$

3-4: $pv^k = const$; (адиабатный процесс расширения)

Точка «4»:

$$v_4 = v_1; p_4 = p_3 \left(\frac{v_3}{v_4}\right)^k = p_1 \varepsilon^k \left(\frac{v_1 \frac{\Delta}{\varepsilon^k}}{v_1}\right)^k = p_1 \frac{\Delta^k}{\varepsilon^{k(k-1)}};$$

$$T_4 = \frac{p_4 v_4}{R} = T_1 \frac{\Delta^k}{\varepsilon^{k(k-1)}};$$

4-5: $pv^k = const$; (адиабатный процесс расширения выхлопных газов в турбине)

Точка «5»:

$$p_5 = p_1;$$

$$v_5 = v_4 \left(\frac{p_4}{p_5}\right)^{\frac{1}{k}} = v_1 \left[\frac{p_1 \frac{\Delta^k}{\varepsilon^{k(k-1)}}}{p_1}\right]^{\frac{1}{k}} = v_1 \frac{\Delta}{\varepsilon^{k-1}};$$

$$T_5 = \frac{p_5 v_5}{R} = T_1 \frac{\Delta}{\varepsilon^{k-1}};$$

2. Энергетические показатели цикла Дизеля с утилизацией теплоты:

2.1. Работа цикла Дизеля без утилизации теплоты:

$$L_u = \frac{RT_1}{k-1} \left[k\Delta - k\varepsilon^{k-1} + 1 - \frac{\Delta^k}{\varepsilon^{k(k-1)}} \right]$$

2.2. Количество теплоты, подведенное к рабочему телу в камере сгорания:

$$q_1 = c_p (T_3 - T_2) = c_p T_1 (\Delta - \varepsilon^{k-1})$$

2.3. Термический КПД цикла Дизеля без утилизации теплоты;

$$\eta_t = \frac{L_u}{q_1} = \frac{k\Delta - k\varepsilon^{k-1} + 1 - \frac{\Delta^k}{\varepsilon^{k(k-1)}}}{k(\Delta - \varepsilon^{k-1})}$$

2.4. Работа цикла и КПД Дизеля с утилизацией теплоты ВЫХЛОПНЫХ ГАЗОВ:

$$L_{\text{ц}} = L_{\nu 23} + L_{\nu 34} + L_{\nu 45} - L_{\nu 51} - L_{\nu 12} = RT_1(\Delta - \varepsilon^{k-1}) +$$

$$+ \frac{RT_1\Delta}{k-1} \left[1 - \frac{\Delta^{k-1}}{\varepsilon^{k(k-1)}} \right] + \frac{RT_1}{k-1} \cdot \frac{\Delta^k}{\varepsilon^{k(k-1)}} \left[1 - \frac{\varepsilon^{(k-1)^2}}{\Delta^{k-1}} \right] - \frac{RT_1}{k-1} (\varepsilon^{k-1} - 1) -$$

$$- \frac{RT_1}{k-1} (\varepsilon^{k-1} - 1) = \frac{RT_1}{k-1} (k\Delta - k\varepsilon^{k-1} + k - \frac{k\Delta}{\varepsilon^{k-1}}) = \frac{kRT_1}{k-1} (\varepsilon^{k-1} - 1) \left(\frac{\Delta}{\varepsilon^{k-1}} - 1 \right)$$

2.5. Термический КПД цикла Дизеля с утилизацией теплоты ВЫХЛОПНЫХ ГАЗОВ:

$$\eta_t = \frac{L_{\text{ц}}}{q_{23}} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}};$$

На рис.4.5 показан цикл Брайтона с утилизацией теплоты выхлопных газов путём установки на выходе из турбины теплообменного аппарата в p, ν и T, S координатах. Расчёт параметров состояния рабочего тела и энергий, участвующих в термодинамических процессах цикла Брайтона с утилизацией теплоты выхлопных газов производится в следующей последовательности:

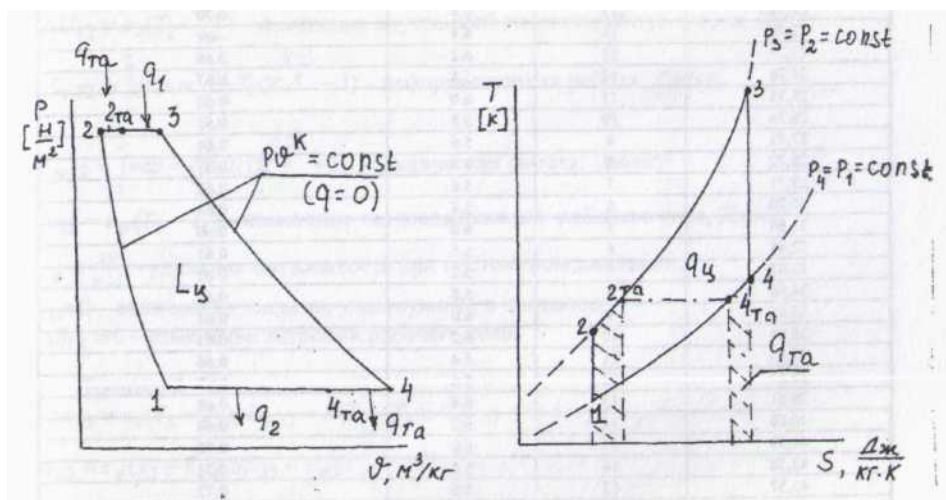


Рис.4.5. Изображение цикла Брайтона с утилизацией теплоты выхлопных газов в p, ν и T, S координатах

1. Задано: p_1, ν_1, T_1 и π, Δ, σ_p

1-2: $p\nu^k = const$; (адиабатный процесс сжатия)

Точка «2»: $p_2 = p_1\pi$; $\nu_2 = \frac{RT_2}{p_2} = \frac{RT_1\pi^{\frac{k-1}{k}}}{p_1\pi} = \frac{\nu_1}{\pi^{\frac{1}{k}}}$; $T_2 = T_1\pi^{\frac{k-1}{k}}$;

2-3; $p = const$; (изобарный подвод теплоты к рабочему телу в камере сгорания)

Точка «3»:

$$T_3 = T_1 \Delta; p_3 = p_2 = p_1 \pi; v_3 = \frac{RT_3}{p_3} = \frac{RT_1 \Delta}{p_1 \pi} = v_1 \frac{\Delta}{\pi};$$

3-4; $pv^k = const$; (адиабатный процесс расширения)

Точка «4»:

$$p_4 = p_1; T_4 = T_1 \frac{\Delta}{\pi^{\frac{k-1}{k}}}; v_4 = \frac{RT_4}{p_4} = v_1 \frac{\Delta}{\pi^{\frac{k-1}{k}}};$$

4-5; $p = const$; (изобарный процесс охлаждения выхлопных газов в теплообменном аппарате)

Точка «5»:

$$p_5 = p_1; T_5 = T_4 - \sigma_p (T_4 - T_2) = T_1 \left[\frac{\Delta}{\pi^{\frac{k-1}{k}}} - \sigma_p \left(\frac{\Delta}{\pi^{\frac{k-1}{k}}} - \pi^{\frac{k-1}{k}} \right) \right];$$

$$v_5 = \frac{RT_5}{p_5} = v_1 \left[\frac{\Delta}{\pi^{\frac{k-1}{k}}} - \sigma_p \left(\frac{\Delta}{\pi^{\frac{k-1}{k}}} - \pi^{\frac{k-1}{k}} \right) \right];$$

2-2'; $p = const$ (изобарный процесс нагревания воздуха в теплообменном аппарате)

Точка «2'»:

$$p_2' = p_2 = p_1 \pi; T_2' = T_2 + \sigma_p (T_4 - T_2) = T_1 \left[\pi^{\frac{k-1}{k}} + \sigma_p \left(\frac{\Delta}{\pi^{\frac{k-1}{k}}} - \pi^{\frac{k-1}{k}} \right) \right];$$

$$v_2' = \frac{RT_2'}{p_2'} = v_1 \left[\pi^{\frac{k-1}{k}} + \sigma_p \left(\frac{\Delta}{\pi^{\frac{k-1}{k}}} - \pi^{\frac{k-1}{k}} \right) \right];$$

2. Энергетические показатели цикла Брайтона с регенерацией теплоты;

2.1. Работа цикла и термический КПД:

$$L_{ц} = \frac{kRT_1}{k-1} \left(\pi^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right) + \frac{kRT_1 \Delta}{k-1} \left(1 - \frac{1}{\pi^{\frac{k-1}{k}}} \right) = \frac{kRT_1}{k-1} \left(\pi^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right) \left(\frac{\Delta}{\pi^{\frac{k-1}{k}}} - 1 \right);$$

$$\eta_t = \frac{L_{\text{ц}}}{q_1} = \frac{(\pi^{\frac{k-1}{k}} - 1) \left(\frac{\Delta}{\pi^{\frac{k-1}{k}}} - 1 \right)}{\Delta - \pi^{\frac{k-1}{k}} - \sigma_p \left(\frac{\Delta}{\pi^{\frac{k-1}{k}}} - \pi^{\frac{k-1}{k}} \right)};$$

2.2. Работа цикла Брайтона и КПД без регенераций тепла:

$$L_{\text{ц}} = \frac{kRT_1}{k-1} (\pi^{\frac{k-1}{k}} - 1) \left(\frac{\Delta}{\pi^{\frac{k-1}{k}}} - 1 \right); \text{ (То есть, работа цикла Брайтона с}$$

регенерацией теплоты не меняется)

$$\eta_t = \frac{L_{\text{ц}}}{q_1} = 1 - \frac{1}{\pi^{\frac{k-1}{k}}}$$

Порядок выполнения задания

1. Используя алгоритмы определения параметров состояния и энергетических показателей, рассчитать циклы Отто, Дизеля с утилизацией теплоты и регенерацией теплоты цикла Брайтона.

2. Определить приращение работы цикла $\Delta L_{\text{ц}}$ в циклах Отто и Дизеля с утилизацией теплоты и увеличение термического КПД в этих циклах.

3. Определить увеличение термического КПД в цикле Брайтона с регенерацией теплоты.

Отчетность по лабораторной работе

Включает:

1. Результаты расчетов параметров состояния в контрольных точках циклов.

2. Значения работы цикла и термического КПД для каждого из заданных циклов.

3. Ответы на контрольные вопросы:

а) напишите и поясните формулы, описывающие процессы в циклах Брайтона с регенерацией теплоты, Отто и Дизеля с утилизацией теплоты;

б) выполните анализ значений работы цикла $L_{\text{ц}}$ в различных циклах;

в) покажите в диаграммах $p-v$ и $T-s$ площади фигур, соответствующие деформационным и техническим работам, а также теплотам, участвующим в процессах.

ЛР-5 ИССЛЕДОВАНИЕ СОПЛА С ТРЕНИЕМ И ПОДОГРЕВОМ (4 часа)

- Цель работы:**
1. Экспериментально исследовать изменение параметров потока в сопле трения и подогрева.
 2. Проанализировать полученные результаты.
Построить график изменения статического давления по длине сопла трения и подогрева.
 3. Сделать выводы, оформить и представить отчёт о лабораторной работе.

Задание на работу

1. В рабочей тетради изобразить схему лабораторной установки для исследования сопла трения и подогрева.
2. Ознакомиться с принципом действия установки. Подготовить установку для проведения эксперимента.
3. Ознакомиться с основными сведениями и с методикой обработки опытных данных.
4. Выполнить эксперимент, произвести необходимые измерения и обработку полученных данных.
5. Построить и проанализировать график изменения статического давления по длине сопла трения и подогрева. Сделать выводы, оформить и представить к защите протокол о работе.

Основные сведения

Течение потока в сопле трения и подогрева является одним из частных случаев неадиабатных течений газа. В общем случае для таких течений характерно наличие тепло- и массообмена с окружающей средой. Условия получения до- и сверхзвуковых режимов неадиабатных течений были сформулированы в 1947г. Л.А. Вулисом в виде закона «обращения воздействий»: **любым внешним воздействием можно вызвать ускорение потока, однако для непрерывного перехода через скорость звука необходимо знак воздействия изменить на противоположный.**

Параметры газового потока могут изменяться под воздействием следующих внешних воздействий:

- 1) геометрического $(dF > 0)$;
- 2) теплового $(dq > 0)$;
- 3) расходного $(dG > 0)$;
- 4) механического $(dL > 0)$;
- 5) гидравлических потерь $(dq_r > 0)$.

Формула закона обращения воздействий может быть записана в виде:

$$(M^2 - 1) \frac{dc}{c} = \frac{dF}{F} - \frac{dG}{G} + \frac{1}{a^2} [dL_{\text{вн}} - k dL_r - (k-1) dq_{\text{вн}}], \quad (5.1)$$

где $M = \frac{c}{a}$ – число Эрнста Маха (1838 – 1916), австрийского физика, впервые предложившего этот критерий для оценки режима течения газового потока в 1886 г.; $a = \sqrt{kp\nu} = \sqrt{kRT}$ – скорость звука.

Из формулы (5.1) следует, что для ускорения до- и сверхзвукового потока соответственно необходимо, чтобы выполнялись следующие условия:

при $M < 1,0$: $dF < 0$ $dG > 0$ $dq_{\text{вн}} > 0$ $dL_{\text{вн}} < 0$	при $M > 1,0$: $dF > 0$ $dG < 0$ $dq_{\text{вн}} < 0$ $dL_{\text{вн}} > 0$
---	---

Тепловое сопло

Тепловое сопло - цилиндрическая труба, по которой без трения течет газ, обмениваясь с внешней средой только количеством теплоты (рис. 5.1).

В этом случае уравнение (5.1) принимает вид:

$$(M^2 - 1) \frac{dc}{c} = - \frac{(k-1) dq_{\text{вн}}}{a^2},$$

из которого следует, что

при $M < 1,0$: $dc > 0$ и $dq_{\text{вн}} > 0$;

при $M > 1,0$: $dc > 0$ и $dq_{\text{вн}} < 0$.

Дифференциальное уравнение сохранения энергии для теплового сопла:

$$dq_{\text{вн}} = di^* = c_p dT^* = c_p dT + c dc .$$

Христианович С.А. показал, что $dT/T = (1 - kM^2) dc/c$, т.е. при подводе теплоты к дозвуковому потоку рост термодинамической температуры прекращается ($dT=0$) при $M = \frac{1}{\sqrt{k}} \approx 0,8$ (сечение «А-А» на рис.5.1 и 5.2).

Из уравнения Бернулли $c dc = -v dp$ следует, что при разгоне потока статическое давление падает.

Полное давление $dp^*/p^* = - dq_{\text{вн}} (1/T - 1/T^*)/R$ также снижается из-за тепловых потерь. Поскольку расход воздуха $G = \rho c F = \text{const}$, то плотность газа изменяется обратно пропорционально росту скорости c , поэтому плотность тока по длине теплового сопла остается неизменной. Процесс течения в тепловом сопле не является политропным (см. рис.5.2).

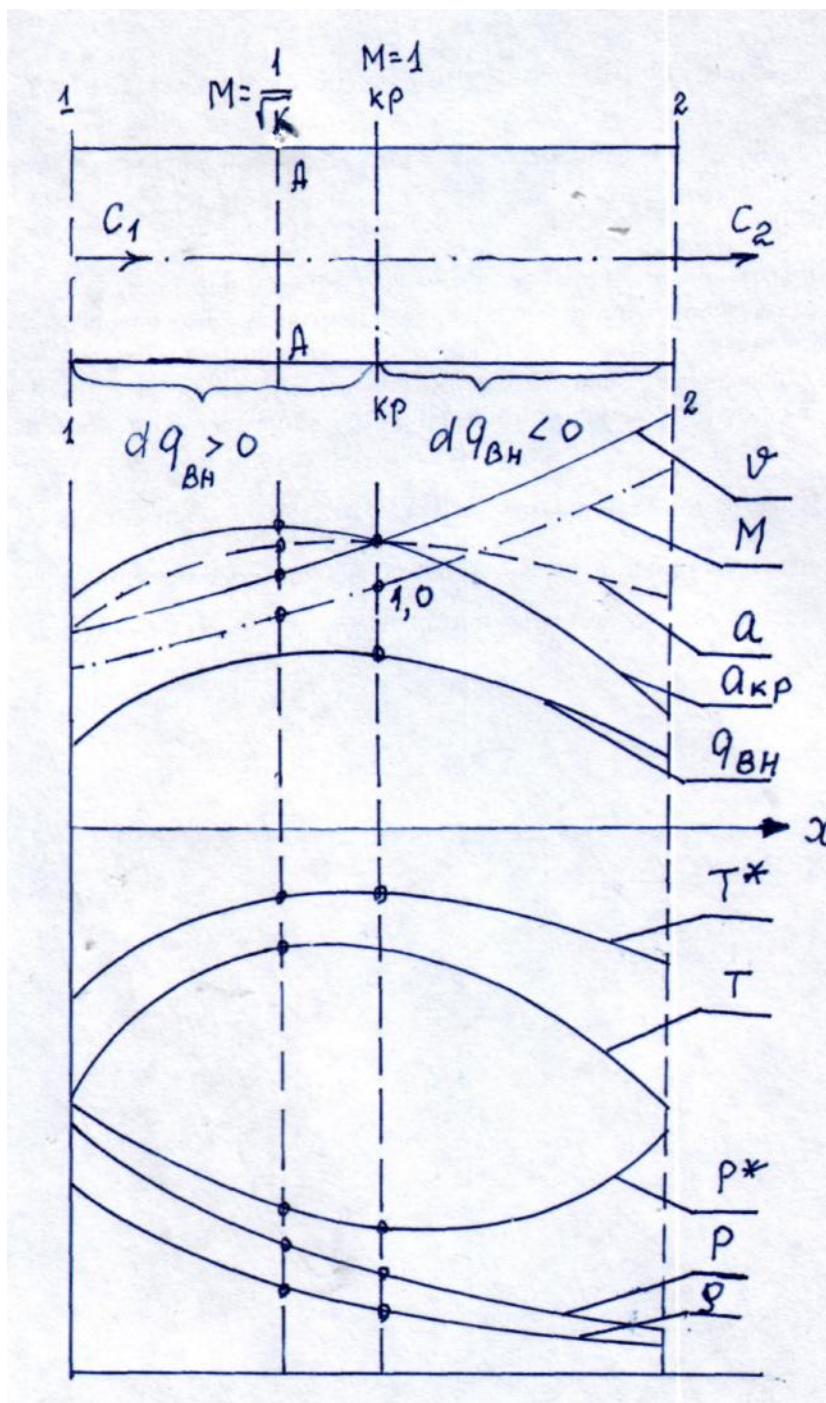


Рис.5.1. Изменение параметров газа при ускорении потока в тепловом сопле:

a – скорость звука; $a_{кр}$ – критическая скорость звука;

v – удельный объём; M – число Маха; $q_{вн}$ – теплота;

T^* – температура торможения; T – действительная температура

в потоке газа; p^* – давление заторможенного потока;

p – статическое давление; $\rho = \frac{1}{v}$ – плотность газа;

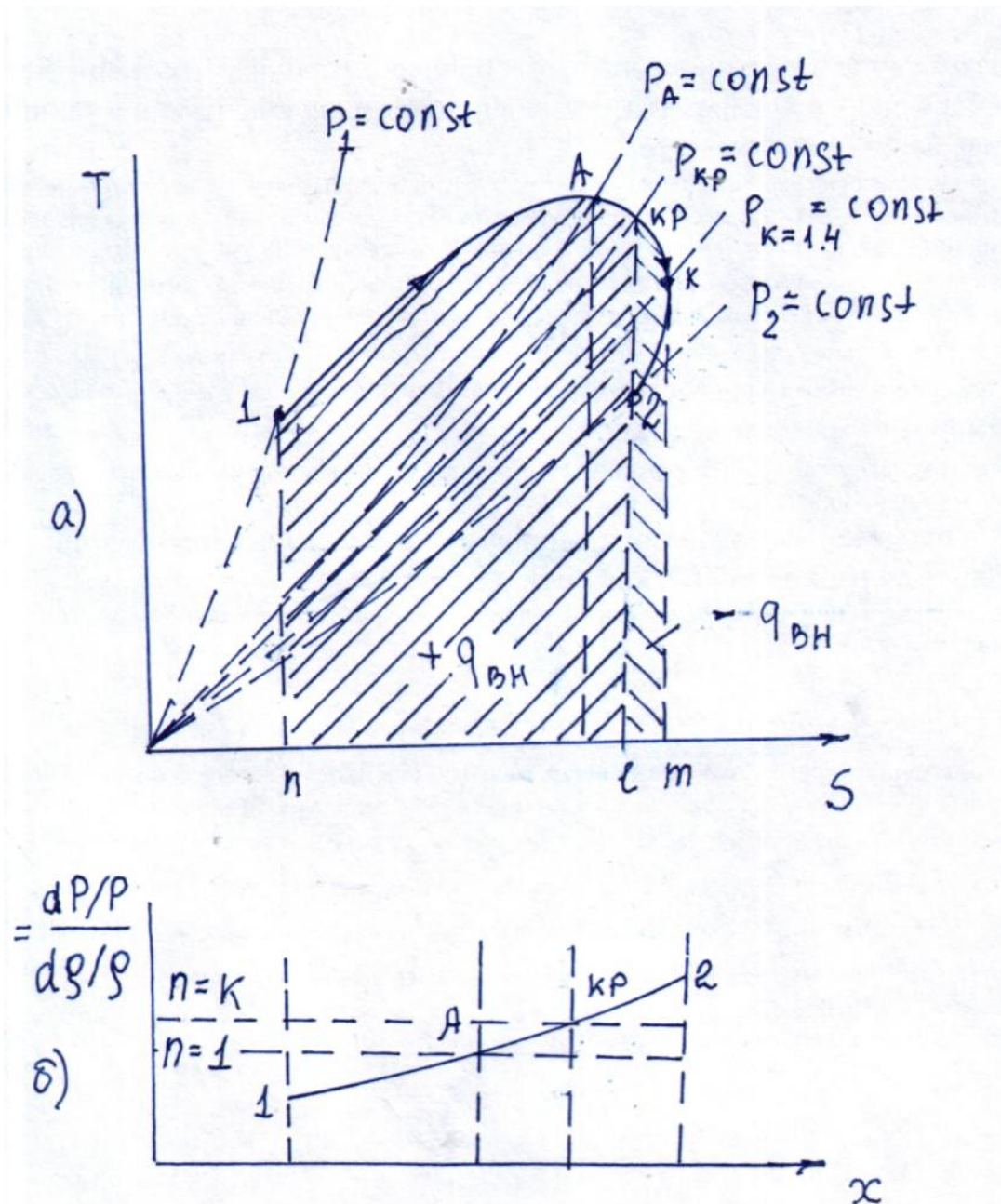


Рис.5.2. Термодинамический процесс в тепловом сопле в T, S – координатах (а) и изменение показателя политропы между сечениями потока газа (б)

Сопло трения

Сопло трения - цилиндрическая труба, по которой газ течет с трением ($dq_r > 0$) о стенки и без других видов внешних воздействий (рис. 5.3). В этом случае формула (5.1) упрощается:

$$(M^2 - 1) \frac{dc}{c} = - \frac{kdL_r}{a^2}.$$

Из уравнения энергии $dT^* = dT + c_p dc / c = 0$ следует, что $dT^* = 0$, т.е. $T^* = \text{const}$, а разгон дозвукового потока ($dc > 0$) осуществляется за счет падения энтальпии ($dT < 0$).

В сверхзвуковом потоке картина обратная ($dc < 0$, $dT > 0$, $dp > 0$) поскольку воздействие трения одностороннее.

Из уравнения $dp^* / p^* = - dq_r / (RT)$ следует, что полное давление из-за гидравлических потерь снижается как в дозвуковом так и в сверхзвуковом потоке. В сопле трения процесс также не является политропным. Показатель политроны n меняется: в дозвуковой области от $n=1,0$ до $n=k$, в сверхзвуковой области от предельного значения $n=\infty$ до $n=k$ (рис.5.4).

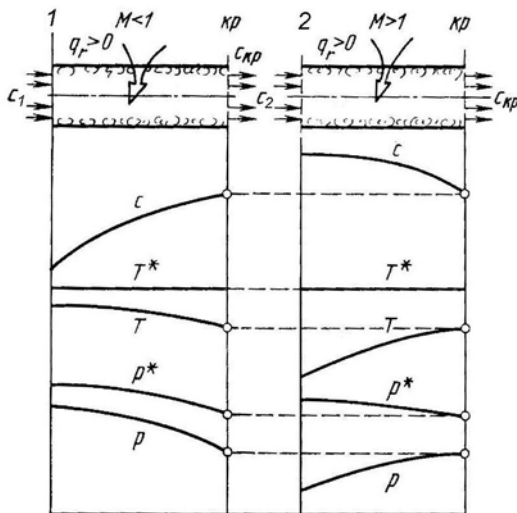


Рис. 5.3. Схема течения в сопле трения

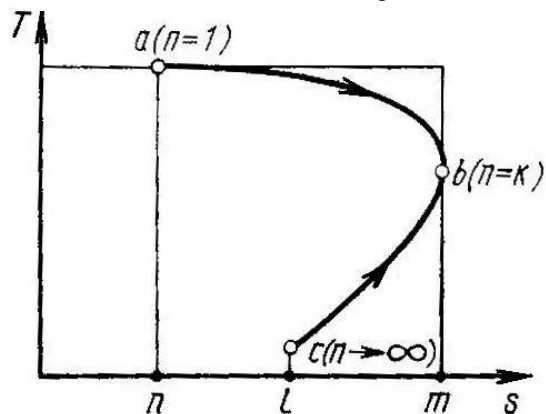


Рис. 5.4. Процесс в сопле трения

Описание лабораторной установки

Схема установки показана на рис. 5.5. Основной участок представляет собой цилиндрическую трубу \varnothing ____ мм и длиной ____ мм. Число калибров (отношение длины к диаметру трубы) составляет ____ - величину достаточную для проявления основных закономерностей при течении потока воздуха по трубе с трением. Труба обмотана нихромовой проволокой и покрыта теплоизоляцией для уменьшения тепловых потерь при подключении проволоки к источнику питания.

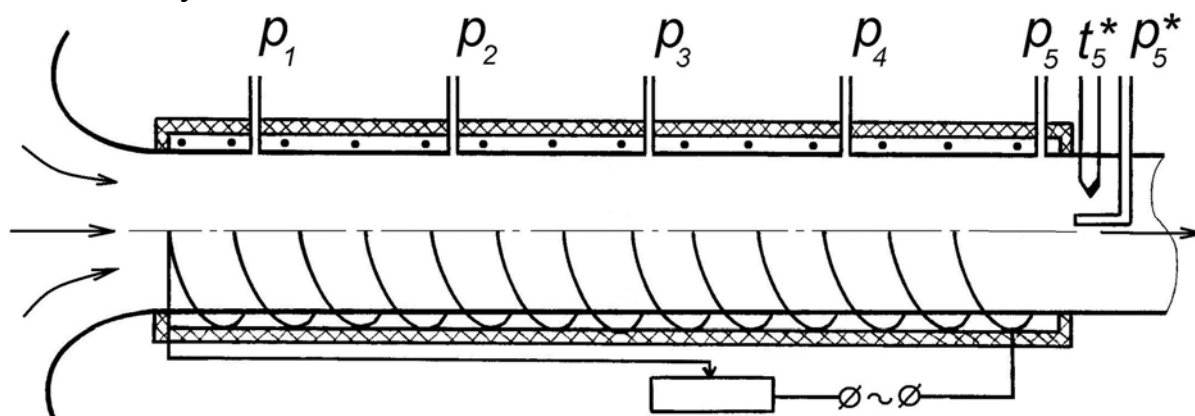


Рис. 5.5. Схема установки для исследования сопла трения и подогрева

По длине трубы имеется пять приемников статического давления, выполненных в виде отверстий в стенке. На выходе из цилиндрического участка трубы установлены приемник полного давления и температуры торможения. Приемник полного давления позволяет оценить гидравлические потери в канале, а приемник температуры торможения – изменение температуры потока при подводе теплоты. При этом на входе в трубу полное давление и температура торможения равны атмосферным.

Поскольку все реальные течения в каналах сопровождаются трением, реализовать тепловое сопло «в чистом виде» не представляется возможным. Поэтому при подводе теплоты к потоку, движущемуся в трубе, дополнительно добавляется и эффект от трения потока о стенки канала. Таким образом, и подогрев потока и трение в реальных течениях проявляются совместно. Это обстоятельство накладывает свой отпечаток на схему установки и методику проведения эксперимента.

Первый этап эксперимента выполняется без пропуска электрического тока через нихромовую проволоку, т.е. исследуется сопло трения. На втором этапе через нихромовую проволоку пропускается электрический ток, и исследуется сопло с трением и подогревом. При выполнении второго этапа эксперимента необходимо осуществлять прогрев трубы в течение 5-7 минут и затем снимать показания приборов.

Порядок проведения эксперимента и методика обработки данных

1. Измерить и записать давление (B_0) и температуру (t_n) окружающего воздуха в лаборатории.
2. Включить источник подачи воздуха через трубу без электроподогрева, установить режим, снять показания приборов и внести их в таблицу.
3. Включить электроподогрев, установить режим (5-7 мин.), снять показания приборов и внести их в таблицу.
4. Выполнить обработку результатов измерений в указанной последовательности, построить графики изменения статического давления по длине сопла трения и сопла трения с подогревом. Оценить гидравлические потери.

Измеряемые величины и формулы для обработки

1. B_0 [мм рт. ст.], t_n [°C] – давление и температура окружающего воздуха;
2. h_i ($i=1\dots5$) [мм вод. ст.] – перепад статического давления по отношению к атмосферному в i – й точке по длине сопла трения и подогрева;
3. h_5^* [мм вод. ст.] – перепад полного давления по отношению к атмосферному на выходе из сопла трения и подогрева;
4. t_5^* [°C] – температура торможения на выходе из сопла трения и подогрева.
5. $p_n = 133,32 \times B_0$ [Па] - давление окружающего воздуха;
6. $\Delta p_5^* = 10 \times h_5^*$ [Па] - перепад полного давления по отношению к атмосферному на выходе из сопла трения и подогрева;
7. $\sigma^* = 1 - \Delta p_5^* / p_n$ – коэффициент сохранения полного давления в сопле трения и подогрева.

Таблица 5.1

Результаты измерений и обработки данных

№ п/п	h_1 , мм H ₂ O	h_2 , мм H ₂ O	h_3 , мм H ₂ O	h_4 , мм H ₂ O	h_5 , мм H ₂ O	h_5^* , мм H ₂ O	t_5^* , °C	Δp_5^* , Па	σ^*
1									
2									
3									

Построить график $h_i=f(i)$ для исследованных режимов работы, проанализировать полученные зависимости, сравнить значения t_n и t_5^* , сделать выводы, оформить протокол по лабораторной работе и представить его к защите. При подготовке отчета ответить на контрольные вопросы.

Отчетность по лабораторной работе

Включает:

1. Схему лабораторной установки.
2. Заполненную табл. 5.1.
3. Графики зависимостей $h_i=f(i)$.
4. Анализ результатов и выводы по работе.
5. Ответы на контрольные вопросы:
 - а) Сформулируйте и запишите закон обращения воздействий.
 - б) Сформулируйте и запишите закон обращения воздействий для сопла трения.
 - в) Сформулируйте и запишите закон обращения воздействий для теплового сопла.
 - г) Дайте обоснование и объяснение снижению полного давления в тепловом сопле.
 - д) Изобразите графически обоснуйте аналитически и поясните изменение параметров потока по длине сопла трения.
 - е) Изобразите графически обоснуйте аналитически и поясните изменение параметров потока по длине теплового сопла.
 - ж) Дайте понятие адиабатных и неадиабатных течений газа.
 - з) Почему течения потока в соплах трения и подогрева не являются политропными?

ЛР-6 ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ЛАТУННОГО СТЕРЖНЯ (4 часа)

Цель работы:

1. Изучение процесса теплопроводности в деталях газотурбинных двигателей.
2. Анализ влияния материалов деталей на коэффициент теплопроводности.
3. Изучение методики экспериментального определения коэффициента теплопроводности латунного стержня.

Задание на работу

1. В рабочей тетради изобразить схему лабораторной установки для определения коэффициента теплопроводности латунного стержня.
2. Ознакомиться с принципом действия установки. Подготовить установку для проведения эксперимента.
3. Ознакомиться с основными сведениями и с методикой обработки опытных данных.
4. Произвести измерения:
 - температуры t_0 наружного воздуха в лаборатории;
 - температуры t_k конца стержня;
 - напряжения U_B и силы тока I_B в цепи нагревателя;
 - температуры t_i в отдельных точках стержня ($i=1...10$).
5. Выполнить обработку экспериментальных данных.
6. Оформить отчет по лабораторной работе.

Основные сведения

Теплопроводностью вещества называют процесс переноса энергии микрочастицами (молекулами, атомами, электронами и др., движущимися со скоростями, пропорциональными их температуре). За счет взаимодействия друг с другом быстродвижущиеся микрочастицы (свободные электроны в твердом теле) отдают энергию более медленным, перенося таким образом теплоту из зоны с высокой в зону с более низкой температурой. Таким образом, передача теплоты в металлах осуществляется только теплопроводностью.

Применительно к авиационным ГТД теплопроводность встречается очень часто. Например, перенос теплоты от рабочих лопаток к диску в ступени турбины, от диска к валу и далее к опорам (подшипникам) осуществляется теплопроводностью, в процессе которого участвуют

различные металлы и неметаллические материалы. Знание температуры лопатки и диска в различных их точках позволяет определить их запасы прочности (ресурс работы).

Совокупность значений температуры во всех точках тела в данный момент времени называют **температурным полем**. Различают стационарное температурное поле, когда температура во всех точках тела не зависит от времени, и нестационарное. Кроме того, если температура изменяется по одной или двум пространственным координатам, то температурное поле называют соответственно одно - или двумерным.

Геометрическое место точек, температура в которых одинакова, называют **изотермической поверхностью**. **Градиент температуры $grad\ t$** - есть вектор направленный по нормали к изотермической поверхности. Скаляр этого вектора численно равен производной от температуры по этому направлению.

Согласно закону **Жана Батиста Жозефа Фурье** (1768 – 1830), опубликованном в его работе «Аналитическая теория тепла» (1822г.) вектор плотности теплового потока q (или мощность теплового потока, равная отношению количества теплоты Q передаваемой в единицу времени к произвольной площади F , то есть $q=Q/F$), передаваемого теплопроводностью, пропорционален градиенту температуры:

$$q = -\lambda \cdot grad\ t, \quad (6.1)$$

где λ - **коэффициент теплопроводности вещества**, Вт/(м. К).

Знак минус в формуле (6.1) указывает на то, что вектор q направлен противоположно вектору $grad\ t$, то есть в сторону наибольшего уменьшения температуры.

Величина λ зависит в основном от скорости движения молекул, которая, в свою очередь, растет с увеличением температуры и уменьшением массы молекул.

В таблице 6.1 приведены значения коэффициента теплопроводности некоторых материалов. Наибольшей теплопроводностью обладают металлы за счет теплового движения электронов ("электронного газа"), которые более чем в 3000 раз легче молекул самого легкого газа - водорода. Наилучшими **изоляторами являются газы, пористые материалы (пробка, волокнистые материалы типа ваты и др.), коэффициент теплопроводности которых менее 0.25 Вт/(м. К)**.

Для большинства твердых тел, жидкостей и газов коэффициент теплопроводности от температуры выражается формулой:

$$\lambda = \lambda_0(1 + bT), \quad (6.2)$$

где λ_0 - коэффициент теплопроводности при $T = 273 + t, K$; b - коэффициент пропорциональности.

Таблица 6.1

Коэффициент теплопроводности материалов

Наименование Материала	Коэффициент теплопроводности $\lambda, \frac{Вт}{м \cdot К}$	Наименование материала	Коэффициент теплопроводности $\lambda, \frac{Вт}{м \cdot К}$
Серебро	418.7	Вода	0.5513
Медь	389.6	Дуб	0.2
Латунь	86.5	Спирт этиловый	0.1884
Железо	74.4	Водород	0.1721
Титан	15.1	Асбест листовый	0.1163
Бетон	0.84	Керосин	0.1161
Стекло	0.7443	Воздух сухой	0.0244

Обычно коэффициент теплопроводности определяют опытным путем. Для этого используется уравнение Фурье (6.1), в которое подставляются экспериментальные значения количества теплоты Q , площади распространения тепла F и изменение температуры $\delta T/\delta n$. Процесс передачи теплоты принимается стационарным.

В настоящей лабораторной работе объектом исследования является латунный стержень постоянного сечения ($F=const$), перенос теплоты в котором осуществляется по длине стержня (от одной изотермической поверхности к другой, при этом теплоотдачей от наружной поверхности стержня во внешнюю среду пренебрегаем). Температуру стержня в сечении можно принять неизменной и переменной только по длине стержня. Длина стержня выбирается таким образом, чтобы тепло не доходило до конца стержня. То есть, начиная с определенного расстояния от начала нагретого стержня температура не изменяется по длине (рис.6.1).

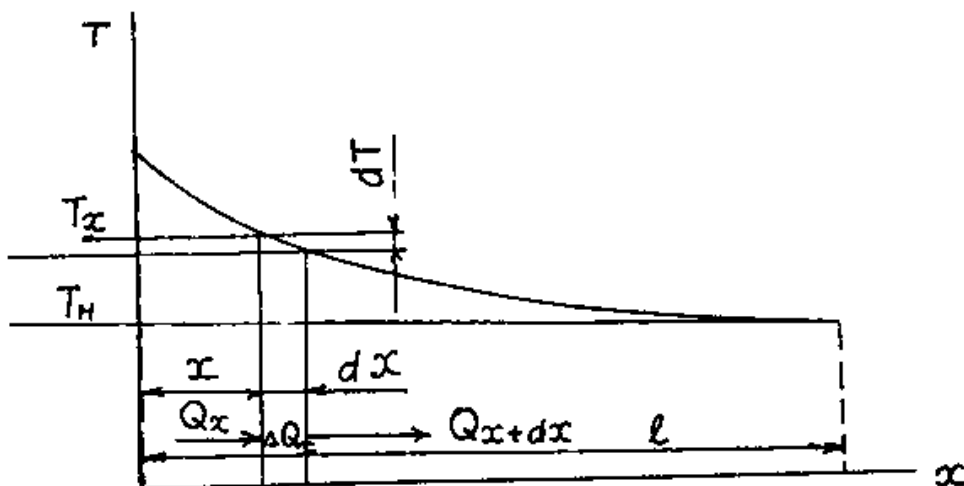


Рис.6.1. Изменение температуры и теплового потока по длине стержня

Рассмотрим баланс тепла на участке стержня dx :

$Q_x = -\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_x F$ - количество тепла, подведенное к выделенному элементу стержня dx ;

$Q_{x+dx} = -\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x+dx} F$ - количество тепла, отведенное от выделенного элемента теплопроводности в правую часть стержня;

$\Delta Q = Q_{x+dx} - Q_x = \frac{\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_x - \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x+dx}}{dx}$ - количество тепла, переданное в единицу времени с боковой поверхности стержня в окружающую среду.

Интегрируя полученное соотношение после математических преобразований получаем:

$$\lambda_x = \frac{Q_{1x}}{F(T_k - T_H) L n \frac{T_k - T_H}{T_x - T_H}}, \frac{\text{Вт}}{\text{м.К}}$$

где T_k – температура нагретого конца стержня.

Описание лабораторной установки

Экспериментальная установка, схема которой представлена на рис.6.2, состоит из электрической печи 1, в которую вставлены два латунных стержня длиной $l=0.6$ м и диаметром $d=0.008$ м.

Концы стержней плотно вставляются в специальные отверстия в торцевых заглушках электропечи. Электрическая мощность печи регулируется реостатом 5. Напряжение и сила тока, потребляемые печью, измеряются амперметром 3 и вольтметром 4.

Для определения температуры стержня равномерно по его длине установлено 10 хромель-копелевых термопар 6. Кроме того, одна термопара установлена внутри электропечи в том месте, где находится конец стержня. Эта температура принимается равной температуре конца стержня T_k . Все термопары, установленные на стержне, через переключатель 8 присоединены к указателю температуры 7.

Термопары установлены на расстоянии $\Delta l=0.05$ м друг от друга; первая термопара, ближайшая к электропечи, установлена на расстоянии $\delta=0.03$ м от ее торцевой поверхности.

Порядок проведения экспериментов и методика обработки опытных данных

1. Подготовить две таблицы для занесения в них результатов измерения и обработки экспериментальных данных (табл. 6.2, 6.3).

2. Включить нагреватель электропечи и, пользуясь реостатом, установить заданный режим по показанию вольтметра.

3. После полного нагрева электропечи, соответствующего установившемуся показанию термопары, помещенной внутри печи, записать все показания приборов: силу тока I , напряжение U в цепи нагревателя; температуру конца стержня T_k и температуру всех 10 термопар, установленных по длине стержня. Результаты измерений записать в табл. 6.2.

4. Установить следующий режим работы нагревателя и повторить все замеры.

5. Измерить температуру наружного воздуха в лаборатории:

$$t_n = \text{ } ^\circ\text{C}; T_n = t_n + 273 = \text{ } \text{K}$$

6. Провести следующие расчеты:

а) количество энергии, выделяющееся в нагревателе электропечи на данном режиме работы $Q_H = IU$, Вт;

б) количество тепла, подводимое к каждому стержню

$$Q_1 = 0,5KQ_H, \text{ Вт}$$

где $K=0.2\dots 0.4$ - коэффициент, учитывающий потерю тепла нагревателя через боковую поверхность печи, выполненную из дюралюминиевого сплава;

в) коэффициент теплопроводности

$$\lambda_x = \frac{Q_1 x}{F(T_k - T_n) L n \frac{T_k - T_n}{T_x - T_n}}$$

где T_k – температура нагретого конца стержня;

$x = \delta + \Delta l(i - l)$ - расстояние от торцевой поверхности электропечи до сечения стержня, в котором установлена 1-я термопара;

$F = \pi d^2 / 4$ площадь поперечного сечения стержня.

Расчеты коэффициента теплопроводности проводятся для первых 3-4 сечений, в которых установлены термопары и наиболее значительное изменение температуры. Результаты расчетов занести в табл. 6.3.

г) провести сопоставление коэффициентов теплопроводности, полученных экспериментально с табличными данными.

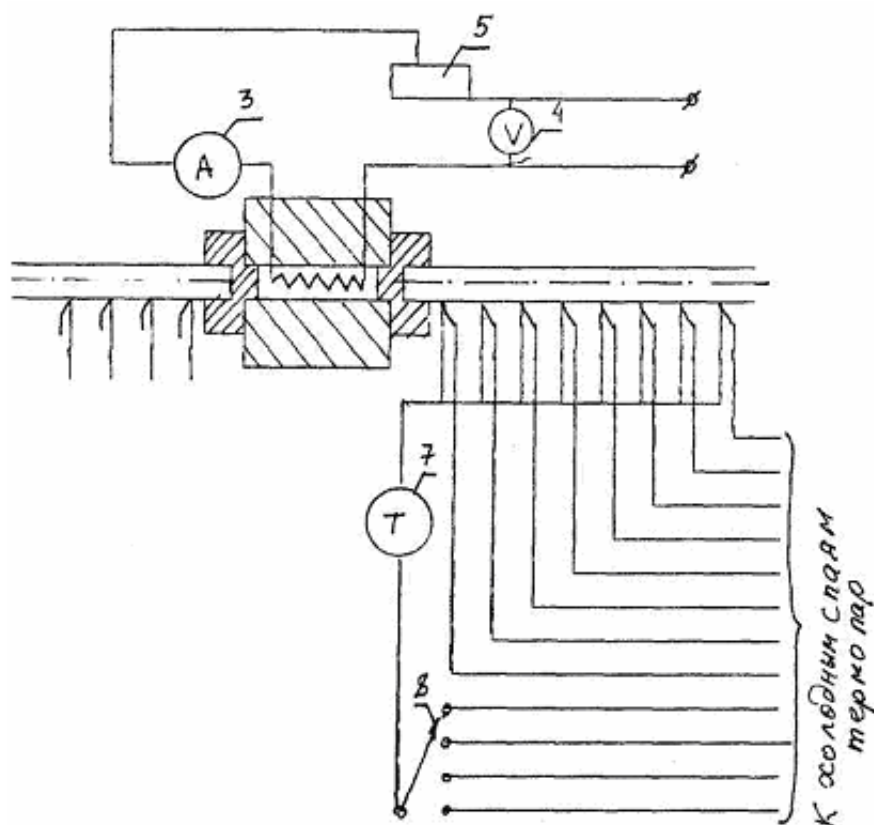


Рис.6.2. Схема лабораторной установки

Таблица 6.2
Результаты обработки экспериментальных данных

Параметры электропечи		Температура конца стержня t_k °C	Значения температур по длине стержня t_i , °C										
I A	U B		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	

Таблица 6.3

Результаты обработки экспериментальных данных

Номер режима	Номер термопары	I А	U В	T _x К	Q _н Вт	Q ₁ Вт	X м	T _н К	F м ²	λ $\frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$
1	1									
	2									
	3									
	4									
2	1									
	2									
	3									
	4									

Отчетность по лабораторной работе

Включает:

1. Схему лабораторной установки.
2. Заполненные табл. 6.2 и 6.3.
3. Алгоритм обработки экспериментальных данных.
4. Выводы при сопоставлении опытных значений коэффициента теплопроводности с табличными значениями (см. табл. 6.1).
5. Ответы на контрольные вопросы:
 - а) При каких условиях справедлива используемая в лабораторной работе формула для определений коэффициента теплопроводности?
 - б) Какова должна быть минимальная длина стержня для определения коэффициента теплопроводности?
 - в) Должны ли отличаться значения коэффициентов теплопроводности, найденные для различных режимов работы электропечи и в различных сечениях стержня? На сколько? Почему?
 - г) Что изменилось бы в проведенных экспериментах, если бы передача тепла от стержня в окружающую среду происходила бы не в условиях свободной конвекции с коэффициентом теплоотдачи α_0 , а при вынужденной конвекции с $\alpha = n\alpha_0$ (коэффициент $n > 1$)?
 - д) Что пришлось бы изменить в лабораторной установке, если бы стержни были изготовлены из другого материала, например, стекла или серебра?

ЛБ – 7 ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛООТДАЧИ В УСЛОВИЯХ ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИИ (4 часа)

- Цель работы:**
1. Изучение физической сущности явления передачи теплоты конвекцией.
 2. Естественная и вынужденная конвекция и их влияние на интенсивность теплообмена.
 3. Ознакомление с экспериментальной установкой, с методикой проведения эксперимента и обработкой опытных данных.

Задание на работу

1. В рабочей тетради изобразить схему лабораторной установки для определения коэффициента теплоотдачи.
2. Ознакомиться с принципом действия установки. Подготовить установку для проведения эксперимента.
3. Ознакомиться с основными сведениями и с методикой обработки опытных данных.
4. Произвести измерения:
 - температуры T_0 наружного воздуха в лаборатории;
 - температуры T_k конца стержня;
 - напряжения U_b и силы тока I_b в цепи нагревателя;
 - температуры T_i в отдельных точках стержня ($i=1\dots 10$).
5. Выполнить обработку экспериментальных данных.
6. Построить зависимость коэффициента теплоотдачи от перепада температур и проанализировать эту зависимость.
7. Оформить отчет по лабораторной работе.

Основные сведения

Обычно жидкие и газообразные теплоносители нагреваются или охлаждаются при соприкосновении с поверхностями твердых тел. Например, при обтекании лопаток и корпусов горячим газом в турбинах (или при сжатии воздуха в компрессоре), в обслуживающих системах двигателей (топливной, масляной и др.), происходит передача тепла от газа или жидкости твердому телу. **Процесс теплообмена между поверхностью твердого тела и газом или жидкостью называется теплоотдачей, а поверхность тела, через которую переносится теплота - поверхностью теплообмена или теплоотдающей поверхностью.**

Теплоотдача от теплоносителя к твердому телу (или наоборот) осуществляется через **тепловой пограничный слой**, содержащий "**прилипший к твердому телу подслой**" (скорость движения в котором мала, а в месте соприкосновения его с поверхностью теплоотдачи равна нулю) и ряд других подслоев с различной теплотой (температурой).

Таким образом, толщина пограничного слоя и характер течения подслоев оказывает влияние на процесс теплоотдачи. В прилипшем подслое сохраняется **ламинарный** (слоистый) характер течения, а в остальных подслоях может быть как ламинарный, так и **турбулентный** (вихревой) характер течения. Соответственно, теплоотдача в этих случаях происходит различно. Имеющиеся данные указывают, что в **ламинарной части потока** теплота передается в основном **теплопроводностью**, а в **турбулентной части** - играет решающую роль **конвективный перенос теплоты**.

Из таблицы значений коэффициентов теплопроводности различных веществ, приведенной в предыдущей лабораторной работе, видно, что жидкости и газы имеют низкие значения коэффициента теплопроводности. В результате ламинарная часть потока жидкости или газа обладает большим удельным термическим сопротивлением потоку теплоты. Общее термическое сопротивление при передаче тепла от жидкости или газа к твердой поверхности, или наоборот, определяется толщиной ламинарного участка потока и интенсивностью конвективного теплообмена.

Различают **конвективный теплообмен** при вынужденном движении жидкости или газа (**вынужденная конвекция**) и свободном движении (**естественная конвекция**).

Вынужденным называется движение, обусловленное внешними силами (например, при действии насоса, помпы и т.п.), а **свободным** - движение жидкости или газа в результате изменения их плотности при нагреве (например, движение воздуха относительно отопительных устройств в производственных помещениях, ангарах и т.п.). Вынужденное движение газа или жидкости предполагает наличие также и свободного движения.

Согласно закону **Иссака Ньютона** (1643 – 1727), английского математика, физика, механика, и **Георга Вильгельма Рихмана** (1711 – 1753), русского физика, тепловой поток в процессе теплоотдачи пропорционален площади поверхности теплообмена F и разности температур поверхности t_c и жидкости или газа $t_{ж}$:

$$Q = \alpha F |t_c - t_{ж}|, \quad (7.1)$$

где α [Вт/(м².К)]- **коэффициент теплоотдачи**, характеризующий интенсивность процесса теплоотдачи. Модуль разности температур в формуле (7.1) не учитывает направление теплообмена.

В общем случае коэффициент α зависит от теплофизических свойств газа или жидкости, геометрических размеров твердого тела, распределения скоростей в потоке, шероховатости обтекаемой поверхности и др.

В расчетах обычно известны количество тепла Q и температура теплоносителя $t_{ж}$ (или температура стенки t_c), а также площадь теплообмена F . Неизвестными величинами являются температура t_c (или температура $t_{ж}$) и коэффициент теплоотдачи α .

Для определения α используются **критериальные уравнения теории подобия**:

$$Nu = f(Re, Gr, Pr, l/l_0) \quad (7.2)$$

где $Nu = \frac{\alpha l}{\lambda}$ - критерий **Вильгельма Нуссельта** (1882 – 1957), немецкого физика, характеризующий соотношение между тепловыми потоками при

теплоотдаче и теплопроводности;

$Re = \frac{cl}{\nu}$ - критерий **Осборна Рейнольдса** (1842 – 1912), английского физика и инженера, представляет собой отношение сил инерции (динамического давления $F_{дин} = \frac{\rho c^2}{2}$ к силам вязкого трения $F_{\mu} = \mu \frac{c}{l}$) и является характеристикой движения теплоносителя в пограничном слое (ламинарное или турбулентное);

$\nu = \frac{\mu}{\rho}, \frac{м^2}{с}$ - кинематический коэффициент вязкости теплоносителя;

$\mu, \frac{кг \cdot с}{м}$ - динамический коэффициент вязкости;

$l = \frac{4F}{\Pi}$ – гидравлический размер, равный отношению учетверенной площади канала к его периметру;

$Gr = \frac{g\beta(t_{ж} - t_c)l^3}{\nu_{ж}^2}$ – критерий **Грасгофа**, характеризующий отношение подъемной силы, возникающей вследствие теплового расширения жидкости или газа, к силам вязкости. Критерий Грасгофа используется при описании свободного конвективного теплообмена;

$g, \frac{м}{с^2}$ – ускорение свободного падения;

$\beta = \frac{1}{T}, K^{-1}$ – коэффициент объемного расширения для газа;

$\beta = \frac{\rho_{\text{ж}} - \rho}{\rho_{\text{ж}}(t - t_{\text{ж}})}$ – коэффициент объёмного расширения для жидкостей;

$Pr = \frac{c\rho\nu}{\lambda}$ – критерий **Людвига Прандтля** (1875 – 1953), немецкого

физика, характеризующий теплофизические свойства теплоносителя (теплофизическая константа жидкости или газа);

T – определяющая температура, обычно принимается равной среднеарифметическому значению между температурой теплоносителя $t_{\text{ж}}$ и температурой стенки $t_{\text{с}}$;

$\frac{l}{l_0}$ – масштабный фактор, используется для определения коэффициента теплоотдачи на части поверхности твердого тела, например, на заданной длине участка пластины.

Например, для расчета коэффициента теплоотдачи, расположенного горизонтально круглого стержня в условиях естественной конвекции, обычно пользуются зависимостью вида:

$$Nu_{\text{ж}} = 0.5(Gr_{\text{ж}} Pr_{\text{ж}})^{0.25} \left(\frac{Pr_{\text{ж}}}{Pr_{\text{с}}}\right)^{0.25} \quad (7.3)$$

В качестве примера рассчитаем теплоотдачу цилиндра диаметром $d = 0.035$ м и длиной $l = 0.59$ м, используемого в данной лабораторной работе. Требуется определить коэффициент теплоотдачи в условиях естественной конвекции, если известны температура поверхности цилиндра $t_{\text{с}} = 85^{\circ}\text{C}$ и температура воздуха в лаборатории $t_0 = 20^{\circ}\text{C}$. Теплофизические свойства воздуха при определяющей температуре

$t_{\text{оп}} = \frac{t_{\text{ж}} + t_{\text{с}}}{2} = \frac{85 + 20}{2} = 52.5^{\circ}\text{C}$ находятся из справочной литературы [1]:

$$\lambda_{\text{ж}} = 2.85 \cdot 10^{-2} \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}; \nu_{\text{ж}} = 18.23 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}; Pr_{\text{ж}} = 0.697.$$

Решение.

На рис.7.1 показано поперечное сечение цилиндра с внутренним источником теплоты.

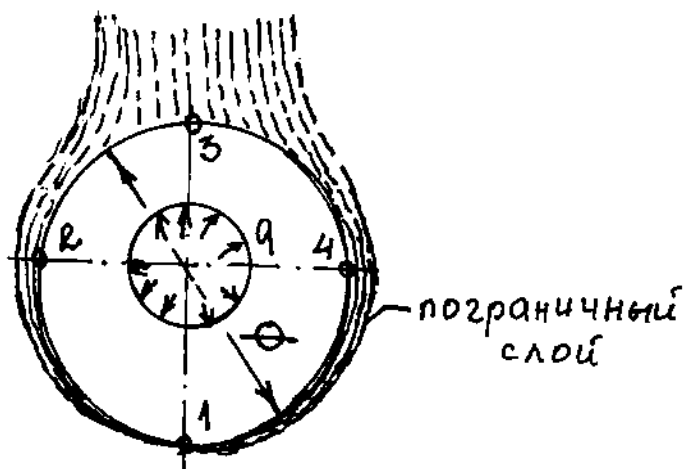


Рис.7.1. Теплоотдача круглого цилиндра с внутренним источником теплоты в условиях естественной конвекции:
 q – тепловой поток; 1, 2, 3, 4 – номера термопар

Из рис.7.1 видно, что пограничный слой в нижней части цилиндра имеет минимальную толщину, а затем она увеличивается при движении воздушного потока относительно поверхности цилиндра вследствие различной плотности нагретого и холодного воздуха.

Характер движения теплоносителя в пограничном слое ниже экватора цилиндра оказывается ламинарным, а выше экватора – турбулентным.

Из-за различной толщины пограничного слоя и характера движения в нем теплоносителя температура его на поверхности цилиндра, а также коэффициент теплоотдачи оказываются различными. Наибольший коэффициент теплоотдачи оказывается в точке «1», наименьшее значение – в точке «3».

Среднее значение коэффициента теплоотдачи данного цилиндра в условиях естественной конвекции находится из критериального уравнения:

$$Nu_{ж} = 0.5(Gr_{ж} Pr_{ж})^{0.25} \quad (7.4)$$

В этом уравнении составляющая $(\frac{Pr_{ж}}{Pr_c})^{0.25}$ отсутствует, так как для газов изменение теплофизических свойств на поверхности твердого тела и в пограничном слое изменяются весьма незначительно ввиду малости ламинарного подслоя.

Объемный коэффициент расширения воздуха

$$\beta = \frac{1}{T_{оп}} = \frac{1}{273+52.5} = 0.003 K^{-1}$$

Безразмерное число Грасгофа:

$$Gr_{\text{ж}} = \frac{g\beta(t_{\text{с}} - t_{\text{ж}})l^3}{\nu_{\text{ж}}^2} = \frac{9.81 \cdot 0.003 \cdot (85 - 20) \cdot 0.035^3}{(18.23 \cdot 10^{-6})^2} = 0.247 \cdot 10^6$$

Здесь определяющим размером является наружный диаметр цилиндра.

Критерий Нуссельта

$$Nu_{\text{ж}} = 0.5(Gr_{\text{ж}} Pr_{\text{ж}})^{0.25} = 0.5 \cdot (0.247 \cdot 10^6 \cdot 0.697)^{0.25} = 10.18$$

Коэффициент теплоотдачи

$$\alpha_{\text{ж}} = \frac{Nu_{\text{ж}} \lambda_{\text{ж}}}{d} = \frac{10.18 \cdot 2.85 \cdot 10^{-2}}{0.035} = 8.29 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}}$$

Количество выделяемой в окружающую среду теплоты

$$Q_{\text{ж}} = \alpha_{\text{ж}} F_{\text{с}} (t_{\text{с}} - t_{\text{ж}}) = \alpha_{\text{ж}} \pi d l (t_{\text{с}} - t_{\text{ж}}) = \\ = 8.29 \cdot 3.14 \cdot 0.035 \cdot 0.59 \cdot (85 - 20) = 34.9 \text{ Вт}$$

Как видно, аналитическое определение коэффициента теплоотдачи достаточно сложно и поэтому возникает необходимость экспериментального его определения.

Описание лабораторной установки

Лабораторная установка для экспериментального определения коэффициента теплоотдачи состоит из металлического цилиндра 1, внутри которого расположен электрический нагреватель 2, ваттметра 3, реостата 4, четырех термопар 5, указателя температуры 6, переключателя 7 и калориметра для размещения холодных спаев термопар 8 (рис.7.2).

Величина электрической мощности, выделяющейся в нагревателе $Q_{\text{н}}$, передается в виде тепла в окружающую среду через боковую поверхность цилиндра Q , а также его торцевые заглушки теплоотдачей Q и тепловым излучением Q' . Некоторая часть тепловой энергии нагревателя отводится теплопроводностью через детали крепления и провода Q'' :

$$Q_{\text{н}} = Q + Q' + Q'' = kQ,$$

где $k=1.05 \dots 1.2$ - коэффициент, учитывающий дополнительный теплоотвод от исследуемого цилиндра.

Замер температуры нагрева поверхности цилиндра производится с помощью четырех термопар, холодные спаи которых для повышения точности измерений помещаются в специальный калориметр, наполненный водой с тающим льдом. Термопары крепятся к поверхности цилиндра в 4-х сечениях равномерно расположенных по длине; в каждом сечении термопара закачивается в специальном углублении в стенке цилиндра, расположенном соответственно под углом 0, 90, 180 и 270 градусов к вертикальной оси.

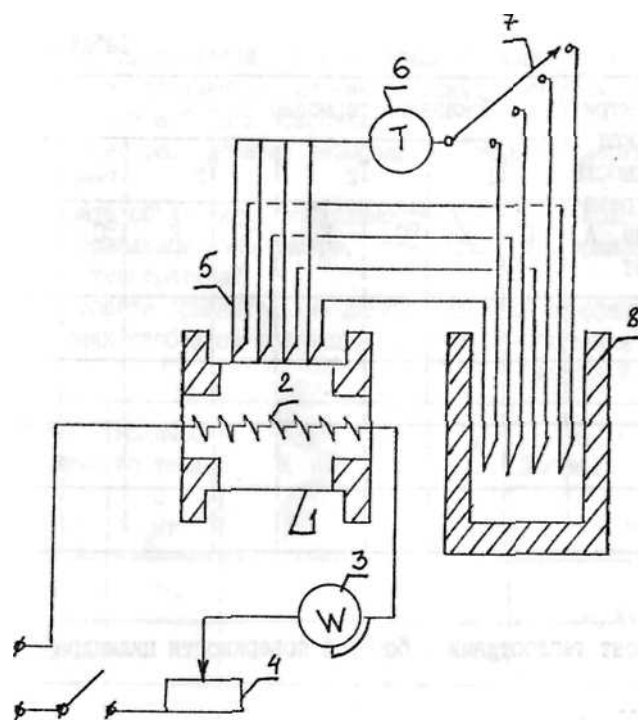


Рис.7.2. Схема установки для определения коэффициента теплоотдачи в условиях естественной конвекции

Такое расположение термопар позволяет избежать ошибки при определении коэффициента теплоотдачи, вызванной различной скоростью обтекания воздухом поверхности нагретого цилиндра в условиях естественной конвекции (минимальной в нижней части цилиндра и максимальной в его верхней части).

Определение значения температуры производится по показаниям электрического потенциометра ЭПВ-О.6. Переключатель 7 позволяет с помощью одного указателя определять показания каждой из термопар.

Изменение режима работы нагревателя осуществляется специальным реостатом, а величина электрической мощности на каждом режиме измеряется ваттметром 3.

Порядок проведения экспериментов и методика обработки опытных данных

1. Измерить и записать температуру окружающего воздуха в лаборатории
 $T_n = t_n + 273K$

2. Подключить установку к электросети, включить нагреватель 2 с помощью выключателя 9. Установить заданное значение мощности нагревателя с помощью реостата 4; мощность нагревателя измеряется ваттметром 3.

Записать значение мощности нагревателя на выбранном режиме A [Вт] в таблицу 7.1.

Таблица 7.1

Номер режима	Электрическая мощность нагревателя, А Вт	Показания термопар							
		T_1		T_2		T_3		T_4	
		°С	К	°С	К	°С	К	°С	К
1									
2									
3									
4									

3. Выдержав нагреватель 2 на заданном режиме электрической мощности в течение 10...15 минут, после выхода исследуемого цилиндра на установившийся тепловой режим (соответствует установившимся показаниям электрического потенциометра ЭПВ-О.6, используемого для измерения температуры), записать показания всех четырех термопар T_1, T_2, T_3 и T_4 (в градусах Цельсия и Кельвина) в таблице 7.1.

4. Установить новое значение электрической мощности нагревателя с помощью реостата 4 и, выполнив требования пункта 3, повторить замеры температур. Работу выполнить для 3 - 4-х различных значений мощности нагревателя.

5. Обработка опытных данных производится в следующей последовательности:

а) В системе СИ величина электрической мощности нагревателя, измеряется ваттметром, численно равна полной тепловой энергии Q_H , передаваемой в окружающую среду экспериментальной установкой: исследуемым цилиндром, электрическими проводами, термопарами, торцевыми заглушками и т.д. Количество теплоты, передаваемое в окружающую среду теплоотдачей боковой поверхностью цилиндра F :

$$Q_H = A; \quad Q = \frac{Q_H}{k}$$

б) Коэффициент теплоотдачи боковой поверхности цилиндра

$$\alpha = \frac{Q}{F(T_{cp} - T_H)}$$

где $F=0.065 \text{ м}^2$ - площадь поверхности цилиндра;

T_{cp} - осредненное значение температуры боковой поверхности цилиндра:

$$T_{cp} = (T_1 + T_2 + T_3 + T_4) / 4$$

Результаты расчетов записать в таблицу 7.2.

в) По данным табл. 7.2 построить зависимость коэффициента теплоотдачи от перепада температур $\alpha = f(\Delta T)$.

Таблица 7.2

Номер режима	Кол-во теплоты Q , Вт	$T_{\text{ср}}$ К	$\Delta T = T_{\text{ср}} - T_{\text{н}}$ К	α , $\frac{\text{Дж}}{\text{м}^2 \text{К}}$
1				
2				
3				
4				

Отчетность по лабораторной работе

Включает:

1. Схему лабораторной установки.
2. Заполненные табл. 7.1, 7.2.
3. График зависимости $\alpha = f(\Delta T)$.
4. Расчет коэффициента теплоотдачи для максимального из режимов работы нагревателя по формулам теории подобия.
5. Ответы на контрольные вопросы:
 - а) Чем определяется экспериментальная мощность нагревателя?
 - б) Каково полученное влияние перепада температур ΔT на коэффициент теплоотдачи α ? Дать пояснения.
 - в) Каково распределение коэффициента теплоотдачи по боковой поверхности цилиндра?
 - г) Дайте объяснение необходимости размещения холодных спаев термопар в специальном калориметре, где должна поддерживаться строго определенная температура?
 - д) Назовите сравнительные данные значений коэффициента теплоотдачи в условиях свободной конвекции $\alpha_{\text{свобод}}$ и при вынужденном движении воздухе $\alpha_{\text{вынужд}}$.

Список литературы

1. Теплотехника. Учебник для вузов/А.П.Баскаков,Б.В.Берг,О.К.Витт и др.; Под ред. А.П.Баскакова. -2-е изд.,перераб. М.:Энергоиздат,1991. 224 с.
2. Артемьев Б.Г. .Голубев СМ. Справочное пособие для работников метрологических служб.-2-е изд.,перераб. и доп. в двух книгах. М.:Издательство стандартов,1986.-Кн.1.352 с.
3. Динеев Ю.Н.,Михненко Л.В.,Рогальский Ю.Н. Методические указания к лабораторным работам N1-6 по дисциплине "Термодинамика,теплопередача и теория АД" для студентов 3 курса всех видов обучения специальности 1610. М.:МИИГА,1987.52 с.
4. Шулекин В.Т. Основы теории и конструирования авиационных двигателей.Конспект лекций. М.:МГТУ ГА,1994.140 с.
5. Преображенский В.П. Теплотехнические измерения и приборы.Учебник для вузов по специальности "Автоматизация теплоэнергетических процессов".- 3-е изд., перераб. М.:Энергия,1978.704 с.
6. Шулекин В.Т. Методические указания к изучению дисциплины" Термодинамика, теплопередача. Теория авиационных двигателей" и контрольные задания № 1, № 2 для студентов 3 и 4 курсов специальности 13.03 заочного обучения. М.:МГТУГА,1995. 96с.
7. Авиационные газотурбинные двигатели. ГОСТ 23851-79. М.:Изд-во стандартов,1979.

**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ**

Кафедра «Двигатели летательных аппаратов»

Шулекин В.Т.

Пособие

к изучению дисциплины «Термодинамика и теплопередача» и
выполнению контрольной работы для студентов 3 курса
специальности 160901 «Техническая эксплуатация летательных
аппаратов и двигателей» заочного обучения

Москва - 2007

Настоящее пособие к изучению дисциплины “Термодинамика и теплопередача” и выполнению контрольной работы издается в соответствии с рабочей программой этой дисциплины учебного плана подготовки инженеров – механиков по специальности 160901 “Техническая эксплуатация летательных аппаратов и двигателей” заочного обучения.

Рассмотрены на заседаниях кафедры “Двигатели летательных аппаратов”, протокол № 1 от 06.09.2007 г. и Методического совета по специальности 160901 Механического факультета, протокол № 1 от 27.09.2007 г.

Рецензент, д.т.н., проф. Коняев Е.А.

Общие указания.

Учебная дисциплина «**Термодинамика и теплопередача**» является составной частью учебного плана подготовки инженера-механика по специальности 130300 «**Техническая эксплуатация летательных аппаратов и авиадвигателей**» для всех обучения. Дисциплина состоит из трёх самостоятельных разделов:

- техническая термодинамика;
- теплопередача.

Техническая термодинамика является частью термодинамики – раздела теоретической физики. **Объектом** исследований технической термодинамики являются **авиационные двигатели – тепловые машины**, в которых изучаются закономерности взаимного превращения теплоты в работу, устанавливается взаимосвязь между тепловыми, механическими и химическими процессами, имеющими место в тепловых машинах.

Теплопередача – это наука, изучающая процессы переноса теплоты (теплообмена) в пространстве с неоднородным температурным полем. В зависимости от характера теплообмена перенос теплоты может быть назван **теплопроводностью** (например, через стенки корпуса), **конвекцией** (например, при охлаждении турбинных лопаток воздухом) и **излучением** (например, при горении топливовоздушной смеси от пламени к стенкам жаровой трубы в камере сгорания).

При изучении названных разделов и подразделов студенту рекомендуется обратить особое внимание на содержание понятий термодинамики и теплопередачи тепловых машин, раскрытие физической сущности протекающих в перечисленных элементах авиационных двигателей. Это позволит затем уяснить эксплуатационные характеристики авиационных ГТД, динамику изменения их с наработкой двигателя, а также осуществить диагностику технического состояния элементов и двигателя в целом. Тем самым обеспечивается повышение безопасности полётов и технико-экономическая эффективность эксплуатации летательных аппаратов и авиадвигателей.

Основной формой изучения данной дисциплины является самостоятельная работа над учебным материалом по рекомендованной литературе, список которой литературы составлен с учётом утверждённой программы дисциплины эталонного комплекта литературы. При этом не следует стремиться к механическому запоминанию всех формул и зависимостей. Главное внимание необходимо уделить раскрытию физического смысла входящих в формулы параметров, уяснить динамику изменения их в процессе эксплуатации и др. Однако твёрдо нужно помнить основные уравнения и формулы. Изучив всю тему, надо проверить свои знания, ответив на контрольные (экзаменационные) вопросы.

В процессе самостоятельной работы студент выполняет контрольную работу. Пояснительную записку к этой работе следует выполнять с соблюдением требований **Единой системы конструкторской документации (ЕСКД)**, изложенных, в основном, в пособиях [1-3], писать чернилами или пастой аккуратно и разборчиво. Страницы должны быть пронумерованы и иметь поля для замечаний рецензента. Графическая часть работ выполняется также согласно ЕСКД, пастой или карандашом, на миллиметровой бумаге в мелкую клетку. Численные значения параметров, а также результаты расчётов надо давать согласно системам СИ и ЕСКД. Необходимо иметь в виду, что деятельность инженера-механика по технической эксплуатации авиадвигателей ГА базируется, в основном, на анализе получаемой информации и принятии соответствующих решений. Поэтому при выполнении контрольной работы необходимо подробное обоснование выбранных коэффициентов, используемых в расчётах, с учётом имеющегося опыта эксплуатации и перспектив развития авиационной техники.

Для лучшего усвоения материала программой дисциплины предусматривается выполнение студентами лабораторных работ, которые проводятся в период семестра (для дневного обучения) или в период лабораторно-экзаменационной сессии (для заочного обучения). При их выполнении рекомендуется ознакомиться с особенностями лабораторных установок, техникой безопасности и методикой проведения экспериментов.

Теоретические знания по дисциплине проверяются при собеседовании (очном рецензировании контрольной работы), защите лабораторной работы и во время зачета.

Для изучения разделов дисциплины рекомендуется следующая литература:

Техническая термодинамика и теплопередача
(основная)

1. Шулекин В.Т. Теплотехника. Ч.1. -М.:МГТУ ГА, 2007.

2. Шулекин В.Т. Гидрогазодинамика и теплообмен. Конспект лекций. Ч.2. - М.:МГТУ ГА, 2002.

(дополнительная)

3. Теплотехника. Учебник для вузов/А.П. Баскаков, Б.В. Берг, О.К. Витт и др; Под ред А.П. Баскакова. 2 – изд., перераб. – М.:Энергоатомиздат, 1991.

1. Техническая термодинамика

1.1. Основные понятия технической термодинамики (для потока с малыми скоростями)

Рекомендуем составить структуру основных понятий термодинамики неподвижного потока (рис.1), изучить их содержание и в рабочей тетради написать его.

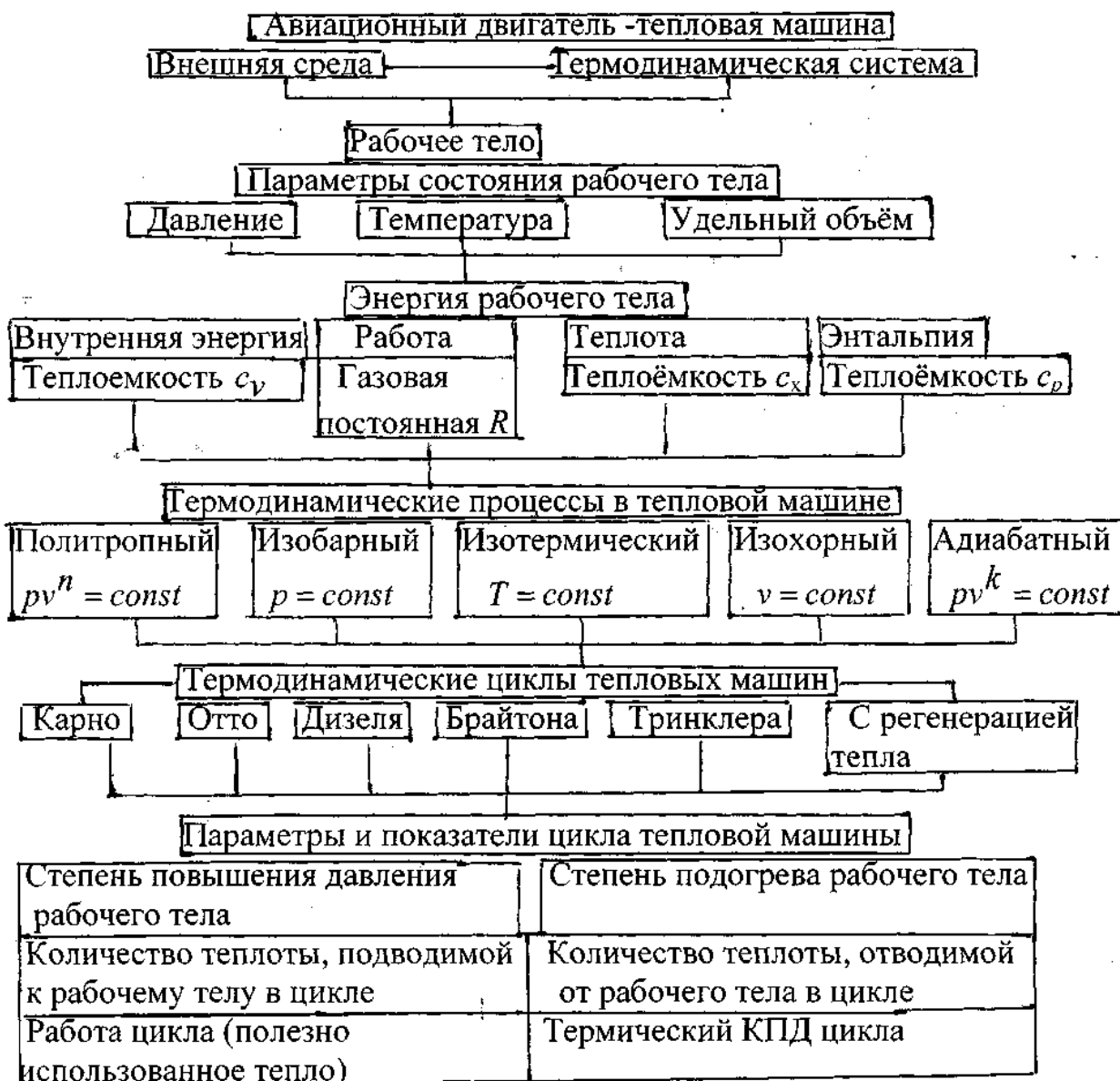


Рис.1. Структура основных понятий термодинамики тепловых машин

1.2. Термодинамическая система представляет собой совокупность материальных точек, находящихся в механическом и тепловом взаимодействиях друг с другом и с окружающими систему внешними телами (внешней средой). **Рабочее тело** представляет собой простейшую термодинамическую систему, которая отделена от внешней среды **контрольной поверхностью (оболочкой)**.

В качестве рабочего тела в авиационных двигателях используется **воздух атмосферы Земли**, представляющий собой смесь различных газов (в составе сухого воздуха содержится азота 78.084 %, кислорода 20.9476 %, аргона 0.934 %, углекислого газа 0.0314 % и др.) и отличающийся, сравнительно, небольшими затратами энергии при сжатии и отдающей внешней среде ту же энергию при расширении. Состав сухого воздуха при стандартных атмосферных условиях ($T_n=288$ К, $p_n=101325$ Н/м²=760 мм рт.ст.) до высоты 90 км наиболее полно приведен в книге Литвинова Ю.А., Боровика В.О. Характеристики и эксплуатационные свойства авиационных турбореактивных двигателей. - М.: Машиностроение, 1979.

К **параметрам состояния** (свойствам рабочего тела) относят давление, температуру, удельный объём (или плотность) и др. При изучении их необходимо уяснить, что они характеризуют собой в данный момент времени взаимодействие рабочего тела с внешней средой. Например, **давление представляет собой распределённую силу, действующую на единицу контрольной поверхности рабочего тела**, которая отделяет тело внешней среды. Изменение давления показывает на характер взаимодействия рабочего тела с внешней средой (при увеличении его возрастают силы действия на оболочку, при снижении давления – уменьшаются) и обуславливает соответствующее конструктивное оформление оболочки.

Температура представляет собой степень нагретости рабочего тела. По изменению температуры контрольной поверхности рабочего тела можно судить о наличии теплообмена рабочего тела с внешней средой. Соотношения между различными температурными шкалами (Кельвина, Цельсия, Фаренгейта и др.), используемыми в авиационной технике, необходимо изучить студенту самостоятельно.

Удельный объём рабочего тела показывает на величину объёма, занимаемого единицей массы тела. Величину, обратную удельному объёму, называют плотностью рабочего тела. В авиационных двигателях плотность рабочего тела меняется в широком диапазоне, поэтому важно знать примерные значения этого параметра состояния в сечениях газоздушного тракта авиадвигателя.

Связь между параметрами состояния для идеального газа называют **уравнением состояния – уравнением Менделеева-Клапейрона:**

$$p\nu = RT \text{ (для 1 кг массы рабочего тела);}$$

$$pV = mRT \quad (\text{для } m \text{ кг рабочего тела}).$$

Газовая постоянная для рабочего тела определяется отношением универсальной газовой постоянной $8314 \frac{\text{Дж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}}$ к массе одного киломоля газа μ кг/кмоль:

$$R = \frac{8314}{\mu}$$

Для сухого воздуха $\mu=28.966$ кг/кмоль, $R = 287 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$, для кислорода

$$R_{O_2} = 259.8 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}, \text{ для природного газа (состоящего в основном из метана)}$$

$$R_{CH_4} = 519.6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}, \text{ для водорода } R_{H_2} = 4157 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

В связи с тем, что все реальные газы в зависимости от своей плотности в большей или меньшей мере отклоняются от уравнения состояния идеальных газов, некоторые учёные пытались уточнить это уравнение путём введения в него поправок, учитывающих особенности реальных газов. Так, в 1873 г.

Ван-дер-Ваальс вывел уравнение состояния реальных газов с поправкой на объём и давление. Оно является приближённым, так как не учитывает физические явления, возникающие в реальных газах при больших плотностях. Наиболее точным уравнением состояния для реальных газов считают соотношение, полученное отечественными учёными **М.П.Вукаловичем** и **И.И.Новиковым** (1939 г.), учитывающее влияние не только сил молекулярного взаимодействия и влияние собственного объёма молекул, но и явление ассоциации молекул.

Контрольные вопросы

1. Что такое термодинамическая система? Приведите примеры различных рабочих тел, используемых в тепловых и холодильных машинах [1].
2. Давление газа 750 мм рт.ст. Выразите это давление в следующих единицах: кгс/см²; Па; атм; бар; мм вод.ст. [1].
3. Температура газа равна 600°C. Выразите эту температуру по шкале **Кельвина, Фаренгейта, Реомюра, Ренкина** [1].
4. Во сколько раз требуется больше энергии при сжатии водорода по сравнению с воздухом (при прочих равных условиях)? [1].
5. Определить плотность воздуха при стандартных атмосферных условиях, пользуясь уравнением состояния для идеальных газов [1].

1.3. Кинетическая энергия поступательного, вращательного и колебательного движения частиц, составляющих рабочее тело, и потенциальная энергия взаимодействия частиц представляют основное содержание **внутренней энергии** рабочего тела, которая меняется при функционировании двигателя. Изменение внутренней энергии рабочего тела в термодинамических процессах определяется по формуле **Джоуля Джеймса Прескотта** (1818 – 1989), английского физика: $\Delta u = c_v(T_2 - T_1)$, где c_v – удельная теплоёмкость в процессе при постоянном объёме ($v = const$).

Работа в термодинамике, так же как и в механике, определяется произведением действующей на рабочее тело силы на путь её действия. Если принять в качестве силы давление, оказываемое телом на контрольную поверхность, а в качестве пути её действия – изменение объёма тела, то

работу $L_v = \int_1^2 p dv$ в данном случае называют **деформационной**. Такая работа

имеет место, например, при перемещении поршня в цилиндре двигателя внутреннего сгорания, где оболочка рабочего тела (поверхность поршня) подвергается деформации (деформационная работа на стенках цилиндра равна нулю).

Если же принять в качестве силы объём рабочего тела, а путь её действия – изменение давления на оболочке рабочего тела, то работу $L_p = \int_1^2 v dp$ в

данном случае называют **технической**. Такую работу совершают над рабочим телом, например, при сжатии в компрессоре газотурбинного двигателя.

В термодинамике для исследования равновесных процессов широко используют p, v – диаграмму, в которой осью абсцисс является удельный объём, а осью ординат – давление. Деформационная работа в этой диаграмме представляется площадью фигуры под кривой процесса относительно оси удельных объёмов, а техническая работа – это площадь фигуры под кривой процесса относительно оси давлений. Наибольшая величина деформационной работы имеет место в изобарном процессе ($p = const$), а наибольшая техническая работа – в изохорном процессе ($v = const$). В изотермическом процессе ($T = const$) деформационная работа равна технической работе. Студенту необходимо знать интегрирование функций, описывающих тот или иной процесс и определять деформационную и техническую работы.

Теплота представляет меру энергии, с которой на молекулярном уровне обменивается рабочее тело с внешней средой. Способы передачи теплоты изучаются в теплопередаче, а в термодинамике полагают, что она имеет место (или отсутствует) на контрольной поверхности рабочего тела.

Подвод (или отвод) теплоты к рабочему телу обычно связан с изменением температуры тела. Отношение количества теплоты, полученного телом, к связанному с этим изменением температуры, называют **теплоёмкостью рабочего тела**. В зависимости от характера процесса теплоёмкость может быть различной. Студенту рекомендуется изучить определения различных теплоёмкостей (**удельная массовая теплоёмкость, удельная объёмная теплоёмкость, средняя теплоёмкость процесса, истинная теплоёмкость**), а также зависимость теплоёмкости от температуры и давления.

Подвод (или отвод) теплоты к рабочему телу также связан с изменением внутренней энергии тела и совершением деформационной работы. Алгебраическое выражение между теплотой, внутренней энергией и работой представляет **первый закон термодинамики** – частный случай всеобщего закона сохранения и превращения энергии. Согласно этому закону **невозможно иметь тепловую машину, в которой работа может быть получена без подвода к рабочему телу теплоты**.

В термодинамике важную роль играет сумма внутренней энергии рабочего тела и произведение давления тела на его объём, называемая **энтальпией (теплосодержанием) рабочего тела**. Подвод (или отвод) теплоты к рабочему телу в этом случае связан с изменением энтальпии и совершением технической работы.

Контрольные вопросы

1. Проанализируйте формулу Джоуля для изменения внутренней энергии. Зависит ли изменение внутренней энергии тела от температуры? [1].

2. Проанализируйте уравнение первого закона термодинамики в дифференциальной и интегральной формах [1].

1.4. Изучение термодинамических процессов необходимо начать с вывода формулы политропного процесса $pv^n = const$ (получаемого путём совместного решения дифференциальных уравнений первого закона термодинамики и состояния идеального газа). Для этого процесса далее написать формулы для расчета:

- параметров состояния в конце процесса; - изменения внутренней энергии и энтальпии рабочего тела; - деформационной и технической работ; - количества теплоты, участвующего в процессе; - доли теплоты, идущей на совершение деформационной и технической работ.

Затем следует проанализировать графики зависимостей изменения внутренней энергии и энтальпии, работ и теплоты от показателя политропы ($-\infty \leq n \leq +\infty$) (рис.2).

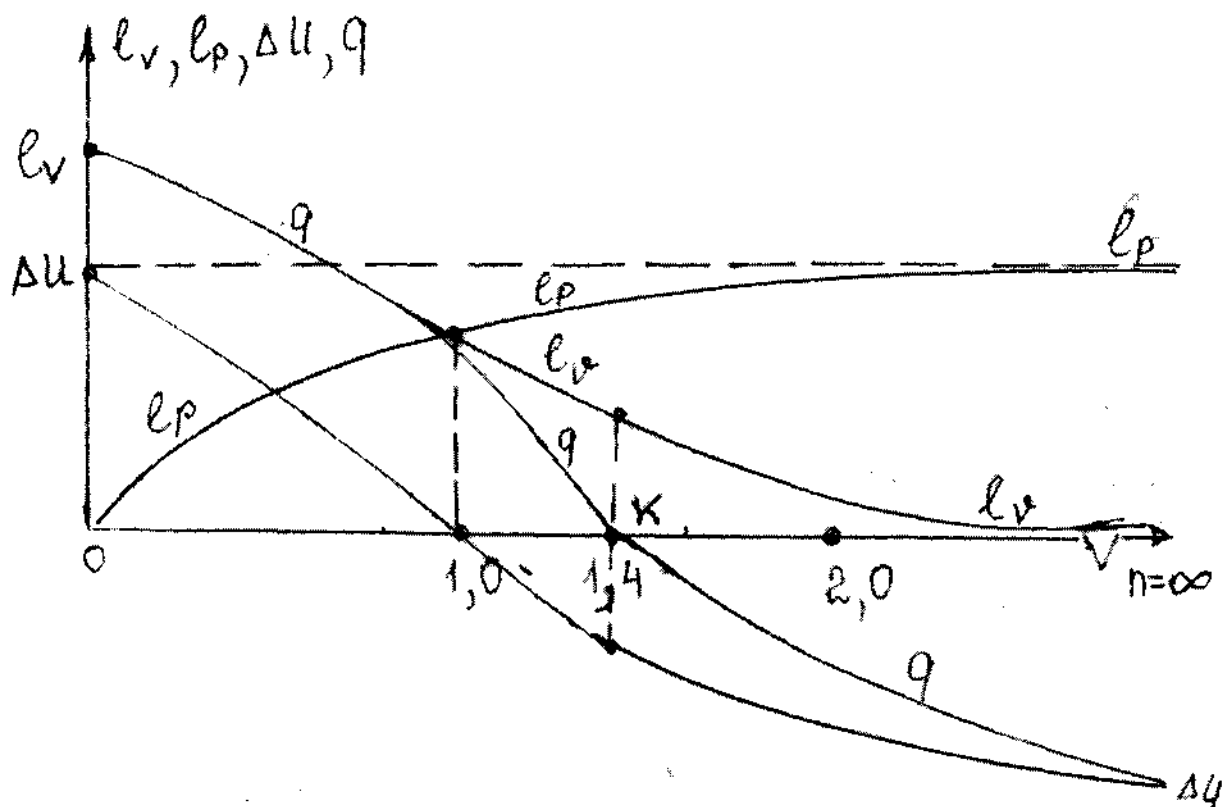


Рис.2. Зависимость деформационной l_v и технической работ l_p , изменения внутренней энергии рабочего тела Δu и теплоты q от показателя политропы n :

$n = 0$ - изобарный процесс;

$n = 1$ - изотермический процесс;

$n = \kappa = 1.4$ - адиабатный процесс для рабочего тела - сухого воздуха;

$n = \infty$ - изохорный процесс

Частные случаи политропных процессов (изобарный, изохорный, изотермический, адиабатный) необходимо представить в p, v - диаграмме (рис.3) и выписать все нужные формулы.

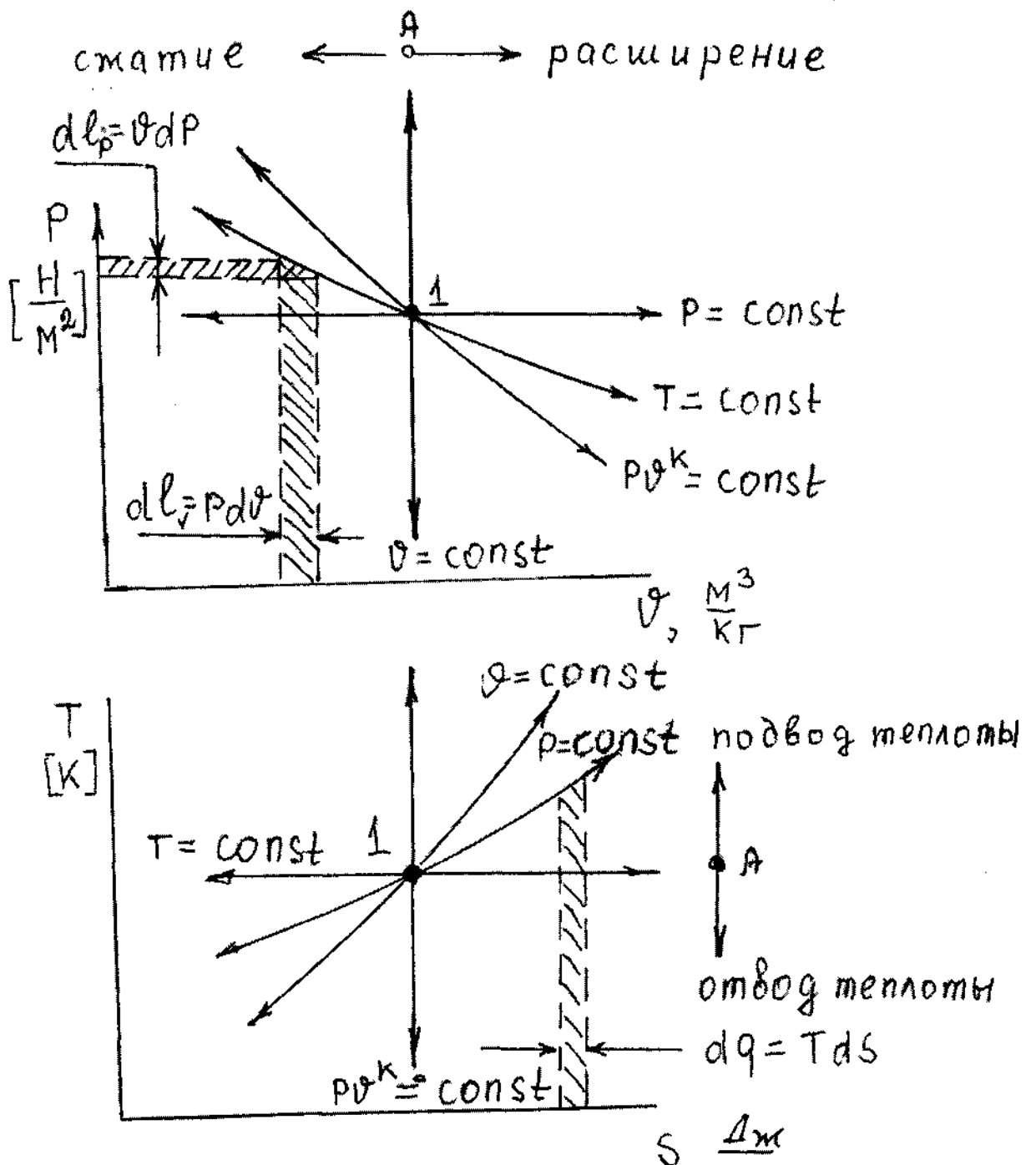


Рис.3. Изображение основных термодинамических процессов в p, v и T, S – координатах

Контрольные вопросы

1. Вывод уравнения политропного процесса [1].
2. Перечислите частные случаи политропных процессов и практическое использование [1].
3. Почему при расширении газа изотерма в p, v – диаграмме располагается над адиабатой, а при сжатии – под адиабатой, если они проводятся из одной точки? [1].
4. Какова работа в политропном процессе? [1].
5. Изобразите зависимость доли превращения теплоты в работу от показателя политропы [1].

1.5. Циклом называют совокупность термодинамических процессов, в результате совершения которых рабочее тело возвращается в исходное состояние. Он может быть прямым и обратным.

Его изучение необходимо начать с цикла, разработанного в 1824 г. **Карно Никола Леонар Сади** (1796 – 1832), французским инженером. Для этого цикла необходимо выполнить:

- расчёт параметров состояния в контрольных точках цикла через начальные параметра (p_1, T_1, v_1);
- изображение цикла в p, v – диаграмме с указанием всех термодинамических процессов;
- расчёт деформационной и технической работ в процессах цикла;
- расчёт количества теплоты, участвующего в процессах цикла;
- расчёт полезной работы цикла (алгебраическая сумма деформационных или технических работ или теплот);
- расчёт термического коэффициента полезного действия (КПД) цикла.

Анализ формулы для термического КПД цикла Карно позволяет получить ряд формулировок **второго закона термодинамики**, например, одна из них гласит «**невозможно, чтобы вся подведенная теплота в цикле к рабочему телу превращалась бы в полезную работу**». Таким образом, **первый закон термодинамики** указывает на необходимость подвода теплоты для получения полезной работы, а **второй закон термодинамики** устанавливает границы преобразования этой теплоты в полезную работу. Тепловая машина, работающая по **циклу Карно** имеет максимально возможный КПД и поэтому этот цикл может быть использован в качестве базы для оценки термодинамического совершенства любого произвольного цикла.

В тесной связи со вторым законом термодинамики находится понятие **энтропии** – **направлении теплообмена между рабочим телом и внешней средой (изменении состояния вещества в различных температурных условиях)**. При подводе извне теплоты к рабочему телу энтропия увеличивается, а при отводе теплоты от рабочего тела к внешней среде – уменьшается. Если теплообмен между рабочим телом и внешней средой

отсутствует, то все процессы, протекающие в рабочем теле, называют **адиабатными**. Необходимо изобразить цикл Карно в энтропийных диаграммах (T,S и i,S), имея в виду, что с их помощью можно показать количество теплоты, подведенное (или отведенное) к рабочему телу, а также преобразованное в полезную работу. Параметрами цикла следует считать **степень повышения давления $\pi=p_2/p_1$ и степень подогрева рабочего тела в цикле $\Delta=T_3/T_1$** .

Цикл Отто (названный так в честь **Отто Николауса Августа** (1832 – 1991), немецкого конструктора, осуществившего этот цикл в 1876 г.), по которому работают поршневые карбюраторные двигатели внутреннего сгорания, состоит из двух адиабатных и двух изохорных процессов. При изучении данного цикла следует обратить внимание на:

- взаимосвязь между **степенью сжатия $\varepsilon=\rho_2/\rho_1$ (или v_1/v_2) и степенью повышения давления $\pi=p_2/p_1$** , которая часто на практике используется для проверки работоспособности цилиндра-поршневой группы ДВС;

- ограничение степени сжатия во избежание появления детонации;

- величину давления и температуры рабочего тела в конце процесса расширения газа в цилиндре, которые могут быть использованы для определения работы турбокомпрессора, предназначенного для наддува топливовоздушной смеси перед сжатием этой смеси в цилиндре двигателя. В результате осуществляется модификация цикла Отто с утилизацией теплоты выхлопных газов: увеличивается работа цикла и термический КПД.

Цикл Дизеля (названный в честь **Дизеля Рудольфа** (1858 – 1913), немецкого инженера, построившего в 1897 г. двигатель, работавший по этому циклу) состоит из двух адиабатных процессов; одного изобарного (подвод теплоты) и одного изохорного процесса (отвод теплоты).

В отличие от цикла Отто, где производится сжатие топливовоздушной смеси с последующей подачей топлива, в цикле Дизеля сжимается чистый воздух. Поэтому степень сжатия в цикле Дизеля намного больше, чем в цикле Отто и это объясняет в значительной мере лучшую экономичность цикла Дизеля.

Так же как и для цикла Отто, необходимо рассмотреть цикл Дизеля с турбонаддувом (отвод теплоты в изобарном процессе), определить полезную работу и КПД модифицированного цикла Дизеля.

Цикл Брайтона, по которому работают газотурбинные двигатели (в том числе и в гражданской авиации), состоит из двух адиабатных и двух изобарных процессов. Следует обратить внимание, что в отличие от циклов Отто, Дизеля, в цикле Брайтона контрольная поверхность рабочего тела остаётся неизменной (лопаточные аппараты не меняют свой формы), поэтому в качестве одного из параметров цикла здесь используется **степень повышения давления, а не степень сжатия**.

Цикл с регенерацией тепла представляет собой цикл Брайтона, в котором производится утилизация отводимого тепла путём переноса теплоты от использованного в тепловой машине рабочего тела, к рабочему телу перед подводом теплоты в цикле. Хотя при этом полезная работа цикла не меняется, однако утилизация теплоты приводит к увеличению термического КПД цикла с регенерацией теплоты (за счёт уменьшения основного количества подводимой теплоты).

Студенту следует составить картотеку по рассмотренным циклам, в которую внести:

- изображение циклов в p, v и T, S - координатах;
- формулы для расчёта подводимой и отводимой теплоты;
- формулы для определения полезной работы цикла;
- формулы для термического КПД.

Контрольные вопросы

1. Изобразите в p, v и T, S - координатах цикл Карно. Почему цикл Карно имеет наибольший термический КПД? [1].

2. Напишите известные Вам формулировки второго закона термодинамики [1].

3. Что называют энтропией и каково её математическое выражение? [1].

4. Приведите формулу для расчёта изменения энтропии в политропном процессе [1].

5. Объясните изменение энтропии в обратимых и необратимых процессах [1].

6. Изобразите площадь фигуры, эквивалентную количеству теплоты, подводимой (отводимой) к рабочему телу в циклах Карно, Отто и др. в T, S - координатах [1].

7. Приведите формулы для полезной работы цикла Карно, Отто, Дизеля, Брайтона, с регенерацией теплоты [1].

8. Приведите формулы для расчёта термического КПД циклов Карно, Отто, Дизеля, Брайтона, с регенерацией теплоты [1].

1.6. Термодинамика газового потока

Отличительной особенностью рабочего тела газотурбинных двигателей гражданской авиации является его перемещение относительно контрольной поверхности (внешней среды). То есть скорость газа. Это обстоятельство необходимо учитывать при анализе термодинамических процессов, протекающих в элементах ГТД и двигателе в целом.

Математический аппарат, описывающий движение газа в авиационных ГТД, представляет собой элементы газовой динамики, базирующейся на термодинамике потока и механике сплошной среды. Этот аппарат обычно

представляют в виде **основных уравнений движения теплоизолированного (адиабатного) потока без учёта сил трения.**

1.6.1. Уравнение неразрывности

Это уравнение показывает, что секундный расход массы в различных сечениях струи газа не изменяется и представляет собой произведение площади сечения, скорости и плотности газа в данном сечении. Студенту рекомендуется изучить вывод этого уравнения и уметь написать его в дифференциальной форме.

1.6.2. Уравнение сохранения энергии

Применительно к потоку газа массой 1 кг это уравнение устанавливает связь между подведенными извне теплотой $q_{\text{вн}}$ (Дж/кг) и работой $L_{\text{вн}}$ (Дж/кг) к рабочему телу с изменением различных видов энергии тела, в том числе:

- внутренней энергии $\Delta u = c_v(T_2 - T_1)$; - энергии проталкивания

$$L_{\text{прот}} = p_2 v_2 - p_1 v_1;$$

- энтальпии (суммы внутренней энергии и энергии проталкивания

$\Delta i = c_p(T_2 - T_1)$; - кинетической энергии $(c_2^2 - c_1^2)/2$; - энергии положения (относительно какой-либо плоскости) $g(H_2 - H_1)$.

При отсутствии внешней работы и теплоты ($q_{\text{вн}} = 0$, $L_{\text{вн}} = 0$), а также $H_2 \cong H_1$, уравнение сохранения энергии между двумя сечениями потока сводится к равенству в этих сечениях суммы двух энергий (энтальпии и кинетической энергии), которые называют **полными энергиями в данных сечениях.** Полная энергия представляется **энтальпией заторможенного потока.**

Студенту рекомендуется написать выражение полной энергии для различных сечений проточной части двигателя, в том числе: для входа и выхода из компрессора и турбины; для входного отверстия воздухозаборника и выходного сечения реактивного сопла.

Большое значение в термодинамике газового потока имеет выражение полной энергии потока с использованием числа Маха ($M = \frac{c}{a} = \frac{c}{\sqrt{kRT}}$) или

приведенной скорости ($\lambda = \frac{c}{a_{\text{кр}}} = \frac{c}{\sqrt{\frac{2kRT^*}{k+1}}}$). Соотношение между

действительной температурой и температурой заторможенного потока с использованием M или λ называют **газодинамической функцией температуры** $\tau(M)$ или $\tau(\lambda)$.

1.6.3. Уравнение Бернулли

Это уравнение представляет собой механическую форму уравнения энергии. Впервые разработано **Даниилом Бернулли** (1700 – 1782), швейцарским учёным. Применительно к теплоизолированному газовому потоку при отсутствии внешней работы оно устанавливает связь между

технической (располагаемой) работой тела и соответствующим изменением кинетической энергии.

Студенту рекомендуется проанализировать уравнение Бернулли для несжимаемого потока ($\rho = const$) и сжимаемого потока ($\rho = var$) и уметь представить его в дифференциальной форме.

Уравнение Бернулли, написанное между двумя сечениями, позволяет установить связь между полным давлением (или давлением заторможенного потока), статическим (или действительным) и динамическим давлением (скоростным напором). Отношение статического и полного давлений называют **газодинамической функцией давления** $\pi(M)$ или $\pi(\lambda)$.

1.6.4. Уравнение обращения воздействий

Совместное решение дифференциальных уравнений:

- неразрывности; - Бернулли; - адиабатного процесса

даёт возможность получить уравнение обращения воздействий для теплоизолированного потока. Оно позволяет построить канал для ускорения или замедления потока при различном режиме течения на входе в этот канал (при различных числах M на входе). Данное уравнение широко используется для построения проточной части лопаточных аппаратов турбомшины, а также для входного и выходного устройств и др.

1.6.5. Течение газа в соплах и диффузорах

Рекомендуется изучить формулы для расчёта скорости истечения газа из сопла и расхода газа. Затем выполнить анализ этих формул для критического режима течения (когда скорость потока равна скорости звука). Изобразите процесс истечения газа в i, S – диаграмме.

Проанализируйте процесс торможения сверхзвукового потока. Уясните сущность прямого и косого скачков уплотнения.

1.6.6. Дросселирование газа. Газовый эжектор

На практике часто встречаются случаи, когда в канале имеются местные сопротивления: резкое расширение, резкое сужение и т.п. Это явление сопровождается образованием вихрей и различных сопротивлений. Описанное явление носит название дросселирования или мятя потока газа.

При изучении

этого процесса следует обратить внимание на изменение параметров состояния, а также на изменение энтальпии, энтропии для реальных и идеальных газов.

Контрольные вопросы

1. Напишите уравнение расхода. Почему при резком увеличении температуры расход газа в сечении уменьшается? [1].

2. Напишите уравнение сохранения энергии для входа в компрессор, на выходе из компрессора [1].

3. Напишите уравнение Бернулли для несжимаемого потока [1].

4. Напишите уравнение Бернулли в интегральной и дифференциальной формах [1].
5. Напишите формулы для критических параметров газа [1].
6. Соотношения для M и λ [1].
7. Изобразите графики газодинамических функций температуры, давления, плотности и относительной плотности тока от приведенной скорости [1].
8. Напишите уравнение обращения воздействий. Выполните анализ этого уравнения [1].

2. Теплопередача

2.1. Теплопроводность

В начале необходимо уяснить содержание следующих понятий теплопередачи:

температурное поле; температурная поверхность; температурный градиент; тепловой поток; коэффициент теплопроводности.

Затем изучить закон Фурье и его использование для:

однослойной и многослойной стенок; однослойной и многослойной цилиндрической стенок; однослойной и многослойной сферических стенок.

Напишите также формулы для коэффициента теплопроводности для различных материалов, что даст представление о тепловой защите.

Контрольные вопросы

1. Поясните содержание понятий: температурное поле, температурный градиент, тепловой поток [2].
2. Что называют коэффициентом теплопроводности и от каких факторов он зависит? [2].
3. Напишите и поясните формулы теплопроводности через плоскую, цилиндрическую и сферическую стенки [2].
4. Изобразите и поясните график изменения температуры через плоскую, цилиндрическую и сферическую стенки [2].

2.2. Конвективный теплообмен

Конвективный теплообмен имеет место при движении жидкости или газа относительно твёрдого тела. Количество теплоты, переданного конвекцией, зависит от физических свойств теплоносителя (параметров состояния его), скорости движения и др. Студенту необходимо иметь знания о ламинарном и турбулентном движении теплоносителя, а также о пограничном слое жидкости или газа около твердого тела.

Конвективный теплообмен описывается уравнением **Ньютона-Рихмана**, одним из важных параметров которого является **коэффициент теплотдачи**. Величина этого коэффициента зависит от характера движения теплоносителя

(ламинарное или турбулентное), вида теплообмена (свободный или вынужденный), физических свойств теплоносителя и др.

Так как явление конвективного теплообмена определяется многими факторами, то в настоящее время это явление изучается в основном экспериментальным путём, причём величина коэффициента теплоотдачи представляется в виде зависимости между тепловыми и гидродинамическими критериями подобия.

Критерии подобия используются при рассмотрении двух подобных потоков, для которых записываются: уравнение теплопроводности; уравнение сплошности; уравнение теплоотдачи; уравнение движения.

Критерии подобия (**Маха, Рейнольдса, Нуссельта, Прандтля** и др.) являются безразмерными. Из них образуются критериальные уравнения, которые описывают различные виды теплообмена и являются основой для расчёта коэффициента теплоотдачи.

Контрольные вопросы

1. Поясните механизм переноса теплоты при конвективном теплообмене [2].
2. Напишите и поясните уравнение Ньютона-Рихмана для конвективного теплообмена [2].
3. Перечислите факторы, от которых зависит коэффициент теплоотдачи [2].
4. Напишите и поясните критерия подобия, отражающие: режим течения теплоносителя; характер движения теплоносителя; конвективный теплообмен; теплопроводность [2].
5. Способы интенсификации конвективного теплообмена [2].

2.3. Теплообмен излучением

Излучение или лучистая энергия является результатом сложных молекулярных и атомных возмущений и возникает за счёт энергии других видов, в том числе, и тепловой. Носителями лучистой энергии являются электромагнитные колебания. В зависимости от длины волны тепловые лучи обладают различными свойствами.

Рассматриваются световые и инфракрасные лучи, имеющие длину волны от 0.4 до 40 мк, называемые тепловыми лучами. Нужно разобраться в понятиях, определяющих абсолютно чёрное тело, абсолютно белое тело, абсолютно пронцаемое тело. Чтобы установить связь между излучательной способностью тела, надо изучить основные законы теплового излучения (Стефана-Больцмана, Кирхгофа). Уяснить физическую сущность процессов, происходящих при лучистом теплообмене между телами.

Контрольные вопросы

1. Каковы физические основы лучистого теплообмена? Напишите уравнение и дайте формулировку закона Стефана-Больцмана для теплового излучения газов [2].
2. Изложите суть закона Кирхгофа [2].
3. В чём отличие газового излучения от твёрдых тел? [2].

2.4. Теплообменные аппараты

Теплообменным аппаратом называют устройство, в котором осуществляется передача теплоты от одного теплоносителя к другому. По принципу действия они разделяются на **рекуперативные, регенеративные и смесительные**.

В рекуперативных аппаратах теплота передаётся от горячего теплоносителя (жидкости или газа) к холодному через разделяющую их твёрдую стенку. Примерами таких аппаратов являются паровые котлы, бойлеры, воздухонагреватели, авиационные радиаторы различных типов.

В регенеративных аппаратах одна и та же поверхность нагрева омывается поочерёдно то горячим, то холодным теплоносителем. Примерами таких аппаратов являются вращающиеся регенераторы газотурбинных двигателей.

В смесительных аппаратах процесс теплоотдачи происходит путём непосредственного соприкосновения горячего и холодного теплоносителей. Примерами смесительных аппаратов являются градирни, камеры смешения двухконтурных турбореактивных двигателей, смесители системы кондиционирования воздушных судов и др.

При проектировании новых теплообменных аппаратов целью расчёта является определение поверхности нагрева, размеров и массы аппарата. Если же площадь нагрева известна, то задача сводится к определению режима работы теплообменного аппарата и определение конечных температур теплоносителей. Для аппаратов, находящихся в работе, целью расчёта может быть определение коэффициента теплопередачи.

При расчёте теплообменных аппаратов определяется коэффициент теплопередачи и средняя разность температур между теплоносителями. Этот теоретический материал должен быть изучен особенно тщательно, так как является основным в расчётах аппаратов. Необходимо разобраться, в каких случаях следует определять среднелогарифмическую разность температур и в каких случаях можно пользоваться среднеарифметической разностью.

Контрольные вопросы

1. Перечислите существующие типы теплообменных аппаратов [2].
2. Что такое среднелогарифмическая разность температур? [2].
3. Поясните работу теплообменных аппаратов, работающих по схеме прямотока, противотока и перекрёстного тока [2].

2.5. Теплообмен при больших скоростях течения газа

При течении газа с большой скоростью, когда кинетическая энергия становится соизмеримой с энтальпией, следует учитывать, что характер взаимодействия твёрдого тела с потоком коренным образом изменяется. Характерная особенность этих процессов заключается в том, что в этих условиях существует органическая связь между гидродинамическими и тепловыми явлениями.

При рассмотрении теплообмена при больших скоростях потока газа вводится понятие температуры восстановления: увеличение скорости движения приводит к возрастанию коэффициента теплоотдачи. Таким образом, переход к большей скорости течения является эффективным средством интенсификации теплообмена.

Контрольные вопросы.

1. Что называют коэффициентом восстановления температуры и какова его зависимость от режима течения газа? [2].
2. Каков характер температурного поля в слоях газа, прилегающих к стенке, при теплоотдаче в условиях большой скорости течения теплоносителя? [2].

Контрольное задание

Заключается в расчёте цикла газотурбинного двигателя (цикла Брайтона) с регенерацией тепла, определении потребной поверхности теплообмена и параметров теплообменного аппарата. Выбор варианта задания осуществляется следующим образом:

1. По табл. 1 определяется число, соответствующее первой букве фамилии студента – А.
2. К числу “А” прибавляется число, образованное двумя последними цифрами шифра студента – В.
3. Номер варианта находится по двум последним цифрам полученной суммы – С.

Пример: Студент Иванов И.И., шифр М200092. Из табл. 1 следует, что первой букве фамилии “И” соответствует число $A=9$. Две последние цифры шифра образуют число $B=92$, то есть $C=92+9=101$. Таким образом, вариант задания - 01.

Таблица 1

А	Б	В	Г	Д	Е	Ж	З	И	К	Л	М	Н	О	П	Р	С	Т
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
У	Ф	Х	Ц	Ч	Ш	Щ	Э	Ю	Я								
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28								

В соответствии с вариантом задания из табл. 2 выписываются исходные данные:

1. Степень повышения давления рабочего тела в цикле $\pi = \frac{p_2}{p_1}$.
2. Степень подогрева рабочего тела в цикле $\Delta = \frac{T_3}{T_1}$.
3. Температура тела в начале цикла T_1 , К. Давление для всех вариантов в данной точке цикла принимается равным $p_1=10^5$ Н/м².
4. Рабочее тело - воздух. Расход воздуха G , кг/с.
5. Степень регенерации тепла σ_p .
6. Параметры теплообменного аппарата:
 - а) форма поперечного сечения канала для горячего и холодного теплоносителей – равносторонний треугольник со стороной b_1/b_2 , мм;
 - б) скорость движения горячего c_1 и холодного c_2 теплоносителей, м/с;
 - в) схема движения теплоносителей – противоток;
 - г) теплопроводностью через стенки канала пренебрегаем.

Порядок выполнения задания следующий:

1. Рассчитываются параметры состояния в контрольных точках цикла:
 - а) точка “1” (рис.4)
 $p_1=10^5$ Н/м²; T_1 – из табл. 2; v_1 – удельный объем (м³/кг) определяется из уравнения состояния идеального газа

$$v_1 = \frac{RT_1}{p_1}, \text{ где } R = 287 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}} - \text{газовая постоянная для рабочего тела}$$
– сухого воздуха;
 ρ_1 – плотность рабочего тела из соотношения $\rho_1=1/v_1$, кг/м³.

В качестве примера: $T_1=288$ К, $v_1= 0.826$ м³/кг, $\rho_1= 1.21$ кг/м³;

б) точка “2”

$$p_2 = p_1 \pi, T_2 = T_1 \pi^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}, v_2 = \frac{RT_2}{p_2} = \frac{v_1}{\pi^{\frac{1}{\kappa}}}$$

где $\kappa = \frac{c_p}{c_v} = 1.4$ - показатель адиабаты для воздуха; $\rho_2 = \frac{1}{v_2}$.

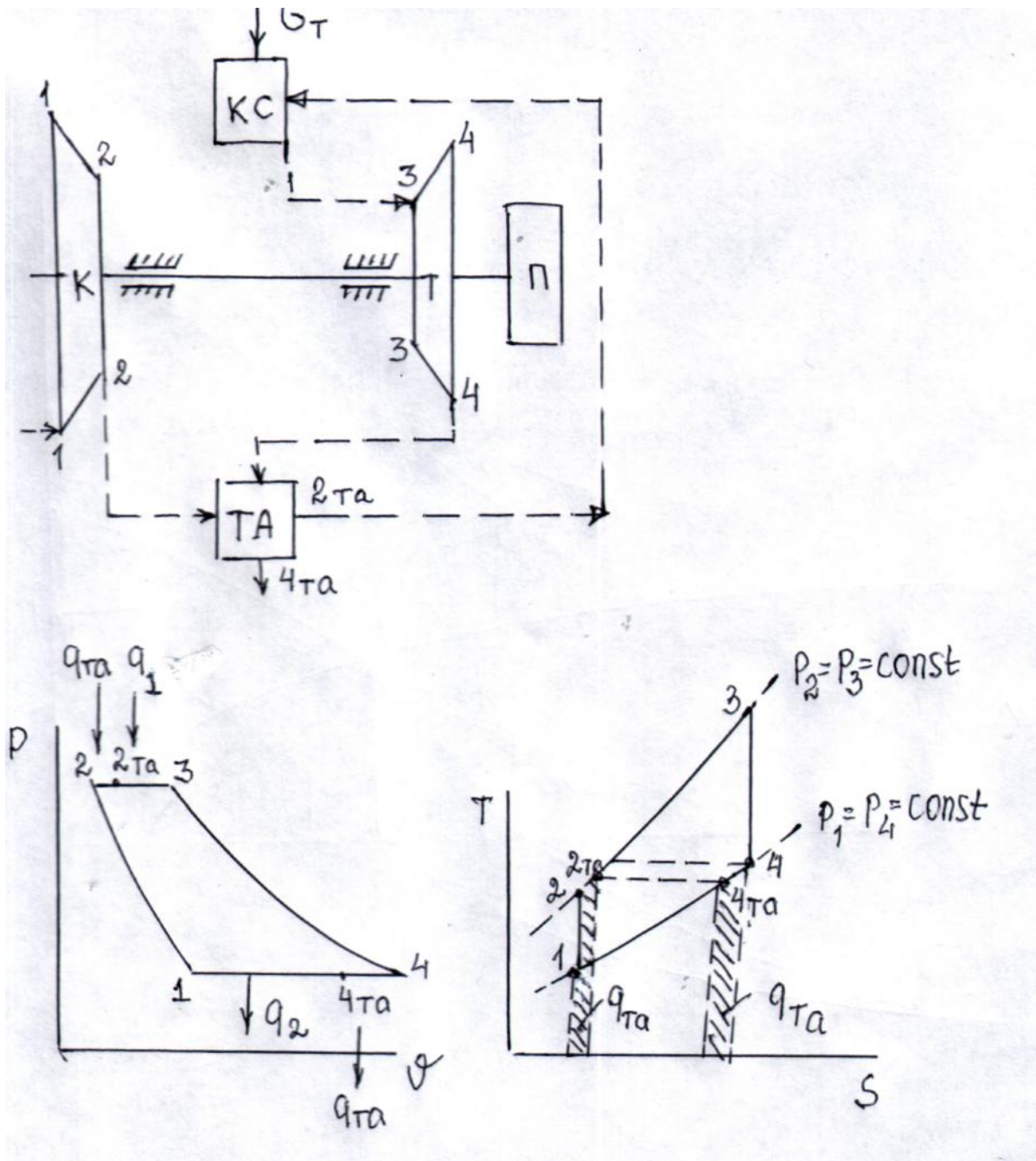


Рис.4. Схема газотурбинного двигателя и изображение цикла ГТД в p, v и T, S - координатах:
 к – компрессор; кс – камера сгорания; т – турбина;
 та – теплообменный аппарат; п – потребитель механической работы; G_T – подоча топлива в камеру сгорания;
 $q_{та}$ – количество теплоты, подводимое к воздуху в теплообменном аппарате

В данном примере: $\pi=10$, $p_2=10^6$ Н/м², $T_2=556.0$ К, $v_2=0.1596$ м³/кг, $\rho_2=6.266$ кг/м³.

в) **точка “3”**

$$p_3=p_2, \quad T_3=T_1\Delta, \text{ где } \Delta - \text{ из таблицы 2; } v_3 = \frac{RT_3}{p_3}, \quad \rho_3 = \frac{1}{v_3}.$$

В данном примере: $p_3=10^6$ Н/м², $\Delta=4.687$, $T_3=1350$ К, $v_3=0.387$ м³/кг, $\rho_3=2.51$ кг/м³;

г) **точка “4”**

$$p_4=p_1, \quad T_4 = \frac{T_3}{\pi^{\frac{k-1}{k}}} = T_1 \frac{\Delta}{\pi^{\frac{k-1}{k}}}, \quad v_4 = \frac{RT_4}{p_4} = v_1 \frac{\Delta}{\pi^{\frac{k-1}{k}}}, \quad \rho_4 = \frac{1}{v_4}.$$

В данном примере: $p_4=10^5$ Н/м², $T_4=699.3$ К, $v_4=2.007$ м³/кг, $\rho_4=0.498$ кг/м³.

2. Определяется изменение внутренней энергии рабочего тела в термодинамических процессах цикла ГТД:

а) **“1-2” - адиабатный**

$\Delta U_{12}=c_v(T_2-T_1)$, где c_v – удельная теплоёмкость рабочего тела при постоянном объёме находится по формуле:

$$c_v = \frac{k}{k-1} R, \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$$

б) **“2-3” - изобарный**

$$\Delta U_{23}=c_v(T_3-T_2);$$

в) **“3-4” - адиабатный**

$$\Delta U_{34}=c_v(T_4-T_3);$$

г) **“4-1” - изобарный**

$$\Delta U_{41}=c_v(T_1-T_4).$$

В данном примере: $\Delta U_{12}=192319$ Дж/кг, $\Delta U_{23}=569665$ Дж/кг, $\Delta U_{34}=-466928$ Дж/кг; $\Delta U_{41}=-295056$ Дж/кг.

Знак “+” означает, что внутренняя энергия тела возрастает в процессе, знак “-” – уменьшается.

3. Рассчитывается изменение энтальпии (теплосодержания) в термодинамических процессах цикла ГТД:

а) **“1-2”**

$\Delta i_{12}=c_p(T_2-T_1)$, где c_p – удельная теплоёмкость при постоянном давлении находится по формуле:

$$c_p = \frac{k}{k-1} R;$$

б) **“2-3”**

$$\Delta i_{23}=c_p(T_3-T_2);$$

в) **“3-4”**

$$\Delta i_{34}=c_p(T_4-T_3);$$

г) «4-1»

$$\Delta i_{41} = c_p(T_1 - T_4).$$

В данном примере: $\Delta i_{12} = 269247$ Дж/кг, $\Delta i_{23} = 797531$ Дж/кг,
 $\Delta i_{34} = -653699$ Дж/кг, $\Delta i_{41} = -413079$ Дж/кг.

Теплосодержание в процессах «1-2» (сжатие) и «2-3» (подвод теплоты) увеличивается (знак «+»), в процессах «3-4» (расширение) и «4-1» (отвод теплоты) – уменьшается (знак «-»).

4. Рассчитывается техническая работа в термодинамических процессах цикла ГТД (эквивалентная площади фигуры в p, v – диаграмме под кривой процесса относительно оси давлений):

а) «1-2»

$$L_{p12} = \int_1^2 v dp = \frac{k}{k-1} RT_1 (\pi^{\frac{k-1}{k}} - 1);$$

б) «2-3»

$$L_{p23} = 0;$$

в) «3-4»

$$L_{p34} = \int_3^4 v dp = \frac{k}{k-1} RT_3 \left(\frac{1}{\pi^{\frac{k-1}{k}}} - 1 \right) = \frac{k}{k-1} RT_1 \Delta \left(\frac{1}{\pi^{\frac{k-1}{k}}} - 1 \right);$$

г) «4-1»

$$L_{p41} = 0.$$

В данном примере: $L_{p12} = 269426$ Дж/кг, $L_{p23} = 0$, $L_{p34} = -653699$ Дж/кг,
 $L_{p41} = 0$.

Знак «+» означает, что из внешней среды к рабочему телу подводится механическая работа, которая преобразуется в потенциальную энергию (при сжатии возрастает плотность газа). Знак «-» соответствует отводимой от рабочего тела во внешнюю среду механической работе за счёт уменьшения потенциальной энергии тела (плотность газа уменьшается).

5. Находится количество теплоты, участвующее в термодинамических процессах цикла ГТД:

а) «1-2»

$q_{12} = 0$ (в адиабатном процессе теплообмен между рабочим телом и внешней средой отсутствует);

б) «2-3»

$$q_{23} = q_1 = c_p(T_3 - T_2) = c_p T_1 \left(\Delta - \pi^{\frac{k-1}{k}} \right);$$

в) «3-4»

$$q_{34} = 0;$$

г) «4-1»

$$q_{41} = q_2 = c_p(T_1 - T_4).$$

В данном примере: $q_{12}=0$, $q_{23}=q_1=797531$ Дж/кг, $q_{34}=0$, $q_{41}=q_2=-413079$ Дж/кг.

Знак “+” показывает, что рабочее тело получает из внешней среды теплоту (например, за счёт горения топлива или из-за трения), знак “-“ – рабочее тело отдаёт теплоту во внешнюю среду.

6. Взаимодействие энергий рабочего тела с внешней средой:

а) алгебраическая сумма изменений внутренних энергий в цикле должна быть равна нулю, так как рабочее тело возвращается в исходное состояние $\Delta U_{12}+\Delta U_{23}+\Delta U_{34}+\Delta U_{41}=0$;

б) алгебраическая сумма технических работ представляет собой полезную работу цикла ГТД (эквивалентную площади фигуры «1234» в p, v – диаграмме) $L_{12}+L_{23}+L_{34}+L_{41}=L_{ц}$;

в) сумма изменений энтальпий в цикле должна быть равна нулю, так как рабочее тело возвращается в исходное состояние $\Delta i_{12}+\Delta i_{23}+\Delta i_{34}+\Delta i_{41}=0$;

г) алгебраическая сумма теплот, участвующих в цикле ГТД, представляет собой полезно использованное тепло (эквивалентное площади фигуры «1234» в T, S – диаграмме) и численно равно полезной работе цикла ГТД $q_{12}+q_{23}+q_{34}+q_{41}=q_{ц}=L_{ц}$.

В данном примере:

$$\Delta U_{12}+\Delta U_{23}+\Delta U_{34}+\Delta U_{41}=192319+569665-466928-295056=0,$$

$$L_{12}+L_{23}+L_{34}+L_{41}=269247+0-653699+0=-384452 \text{ Дж/кг} = L_{ц}.$$

Знак “-“ означает, что рабочее тело в результате осуществления цикла ГТД выделяет во внешнюю среду механическую работу, которая в дальнейшем может быть использована для получения любых других видов энергий $q_{12}+q_{23}+q_{34}+q_{41}=0+797531+0-413079=384452$ Дж/кг.

Знак “-“ перед q_{41} означает возврат теплоты в окружающую среду.

Полезная работа цикла ГТД может быть также найдена по формуле (используется в качестве проверки расчётов):

$$L_{ц} = \frac{k}{k-1} RT_1 \left(\pi^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right) \left(\frac{\Delta}{\pi^{\frac{k-1}{k}}} - 1 \right) = 384452 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}.$$

7. Рассчитывается изменение энтропии в термодинамических процессах цикла ГТД (для определения направления теплообмена между рабочим телом и окружающей средой и для построения T, S – диаграммы) по любой из формул:

$$\Delta S = c_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{v_2}{v_1};$$

$$\Delta S = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{p_2}{p_1}$$

а) «1-2»

$$\Delta S_{12}=0;$$

б) «2-3»

$$\Delta S_{23}=;$$

в) «3-4»

$$\Delta S_{34}=0;$$

г) «4-1»

$$\Delta S_{41}=.$$

$$\text{В данном примере: } \Delta S_{23}=891 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}, \quad \Delta S_{41}= - 891 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}.$$

Знак “+” означает подвод теплоты из вне к рабочему телу, знак “-“ – отвод теплоты от тела в окружающую среду.

8. Коэффициент полезного действия (термический КПД) цикла ГТД без регенерации теплоты находится по формуле:

$$\eta_t = \frac{L_{\text{ц}}}{q_1} = 1 - \frac{1}{\pi^{\frac{k-1}{k}}}.$$

В данном примере: $\eta_t=0.482$.

9. Из выражения для степени регенерации $\sigma_p = \frac{T_2' - T_2}{T_4 - T_2}$

находится температура холодного теплоносителя на выходе из теплообменного аппарата (ТА) по одной из формул:

$$T_2' = T_2 + \sigma_p (T_4 - T_2) = \sigma_p T_1 \left(\frac{\Delta}{\pi^{\frac{k-1}{k}}} - \pi^{\frac{k-1}{k}} \right) + T_1 \pi^{\frac{k-1}{k}}.$$

В данном примере: $\sigma_p = 0.8$, $T_2' = 670.6 \text{ К}$.

10. Из уравнения баланса теплот для ТА

$$q_{22}' = q_{44}' = c_p (T_2' - T_2) = c_p (T_4 - T_4')$$

определяется температура горячего теплоносителя на выходе из ТА

$$T_4' = T_4 - (T_2' - T_2) = T_1 \frac{\Delta}{\pi^{\frac{k-1}{k}}} (1 - \sigma_p) + \sigma_p T_1 \pi^{\frac{k-1}{k}}.$$

В данном примере: $T_4' = 584.7 \text{ К}$, $q_{44}' = q_{22}' = 115115.7 \text{ Дж/кг}$.

11. Рассчитывается термический КПД цикла ГТД с регенерацией теплоты по одной из формул:

$$\eta_t^{\sigma} = \frac{L_{\text{ц}}}{q_1 - q_{22}'} = \frac{(\Delta - e)(e - 1)}{(\Delta - e)e - \sigma(\Delta - e^2)}, \text{ где } e = \pi^{\frac{k-1}{k}}.$$

В данном примере: $\eta_t^\sigma = 0.563$. То есть увеличение КПД в результате регенерации теплоты составляет:

$$\frac{\eta_t^\sigma - \eta_t}{\eta_t} \cdot 100\% = 16.9\%.$$

12. Производится расчёт потребной поверхности теплообмена и других параметров ТА. С этой целью определяются:

а) **определяющая температура** для горячего ($T_{оп1}$) и холодного ($T_{оп2}$) теплоносителей (для расчёта критериев подобия):

$$T_{оп1} = 0.5(T_4 + T_4), \quad T_{оп2} = (T_2 + T_2);$$

б) плотность горячего и холодного теплоносителей при данных температурах из уравнения состояния

$$\rho_{оп1} = \frac{p_1}{RT_{оп1}}, \quad \rho_{оп2} = \frac{p_2}{RT_{оп2}};$$

в) площадь проходного сечения потока для теплоносителей из уравнения расхода

$$F_{оп1} = \frac{G}{\rho_{оп1}c_1}, \quad F_{оп2} = \frac{G}{\rho_{оп2}c_2};$$

г) необходимое количество каналов для теплоносителей

$$z_1 = \frac{F_{оп1}}{F_{кан1}}, \quad z_2 = \frac{F_{оп2}}{F_{кан2}},$$

где $F_{кан1}$, $F_{кан2}$ – соответствующие площади поперечного сечения каналов. Для равностороннего треугольника со стороной b_1 или b_2 имеем:

$$F_{кан1} = \frac{\sqrt{3}}{4} b_1^2, \quad F_{кан2} = \frac{\sqrt{3}}{4} b_2^2;$$

д) по значению температуры $T_{оп1}$ (или $T_{оп2}$) с помощью табл. 3 находятся коэффициенты теплопроводности λ_1 (или λ_2) и динамической вязкости μ_1 (или μ_2) теплоносителей методом линейной интерполяции;

е) эквивалентный гидравлический диаметр канала для горячего и холодного теплоносителей:

$$d_{эқв1} = \frac{4F_{кан1}}{\Pi_{кан1}}, \quad d_{эқв2} = \frac{4F_{кан2}}{\Pi_{кан2}},$$

где $\Pi_{кан1}$, $\Pi_{кан2}$ – соответствующие периметры каналов;

ж) число Рейнольдса

$$Re_1 = \frac{\rho_{оп1} d_{эқв1} c_1}{\mu_1}, \quad Re_2 = \frac{\rho_{оп2} d_{эқв2} c_2}{\mu_2};$$

з) число Нуссельта в зависимости от характера движения теплоносителей:

$$Re \leq 2000 \text{ – ламинарный, } Nu = 0.17 Re^{0.33};$$

$2000 < Re \leq 10^4$ – переходный, $Nu = 0.021 Re^{0.66}$;

$Re > 10^4$ – турбулентный, $Nu = 0.018 Re^{0.8}$;

и) коэффициенты теплоотдачи от горячего теплоносителя к стенке канала (α_1) и от стенки к холодному теплоносителю (α_2):

$$\alpha_1 = \frac{Nu_1 \lambda_1}{d_{\text{эКВ1}}}, \quad \alpha_2 = \frac{Nu_2 \lambda_2}{d_{\text{эКВ2}}};$$

к) коэффициент теплопередачи:

$$K = \frac{\alpha_1 \alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2};$$

л) средний температурный напор в теплообменном аппарате, работающем по схеме противотока:

$$\Delta T = 0.5[(T_4 - T_2') + (T_4' - T_2)];$$

м) необходимая площадь теплообмена:

$$F_{\text{та}} = \frac{Gq_{22}}{K\Delta T};$$

н) необходимая длина каналов для теплоносителей

$$L_{\text{кан1}} = \frac{F_{\text{та}}}{z_1 \Pi_{\text{кан1}}}, \quad L_{\text{кан2}} = \frac{F_{\text{та}}}{z_2 \Pi_{\text{кан2}}}.$$

Затем производится приближённая компоновка теплообменного аппарата. При этом рекомендуется иметь ширину по фронту ТА не более 0.5...0.6 м (из конструктивных соображений); количество рядов для горячего теплоносителя – m , для холодного – $(m-1)$; высота одного ряда для горячего теплоносителя $h_1 = \frac{\sqrt{3}}{2} b_1$, для холодного – $h_2 = \frac{\sqrt{3}}{2} b_2$.

Общая высота ТА равна:

$$H = mh_1 + (m-1)h_2$$

В данном примере:

- горячий теплоноситель: $G=20$ кг/с, $c_1=90$ м/с, $b_1=0.016$ м,
 $T_{\text{оп1}}=642$ К, $\rho_{\text{оп1}}=0.5427$ кг/м³, $F_{\text{оп1}}=0.4094$ м², $F_{\text{кан1}}=1.1065 \times 10^{-4}$ м²,
 $\lambda_1=4.967 \times 10^{-2}$ Вт/(м.К). $z_1=3694$, $\mu_1=31.7073 \times 10^{-6}$ Н.с/м²,
 $d_{\text{эКВ1}}=9.2376 \times 10^{-3}$ м, $Re_1=14230$, характер движения – турбулентный,
 $Nu_1=37.83$, $\alpha_1=203$ Вт/(м².К);

- холодный теплоноситель: $G=20$ кг/с, $c_2=40$ м/с, $b_2=0.008$ м,
 $T_{\text{оп2}}=613.3$ К, $\rho_{\text{оп2}}=5.681$ кг/м³, $F_{\text{оп2}}=0.044$ м², $F_{\text{кан2}}=2.771 \times 10^{-5}$ м²,
 $\lambda_2=4.7308 \times 10^{-2}$ Вт/(м.К). $z_2=3176$, $\mu_2=30.39301 \times 10^{-6}$ Н.с/м²,
 $d_{\text{эКВ2}}=4.6188 \times 10^{-3}$ м, $Re_2=34535$, характер движения – турбулентный,
 $Nu_2=76.88$, $\alpha_2=787$ Вт/(м².К); $K=161$ Вт/(м².К), $\Delta T=28.7$ К, $F_{\text{та}}=498$ м²,
 $L_{\text{кан1}}=5.6$ м, $L_{\text{кан2}}=13.0$ м, $m=119$ рядов для горячего теплоносителя,

$m-1=118$ рядов для холодного - $h_1=0.0138$ м, $h_2=6.928 \times 10^{-3}$ м, $B=0.496$ м (в ряду 31 канал), $H=2.46$ м.

К отчёту по выполнению контрольного задания необходимо:

1. Изобразить схему ГТД с регенерацией тепла (рис.4).
2. На схеме ГТД указать значения температуры, давления и плотности в контрольных точках цикла ГТД.
3. Построить цикл ГТД в p, ν и T, S – координатах в определённом масштабе (рис.4). За начало отсчёта вдоль оси энтропий принять точку “100 Дж/(кг.К)”.
Указать на этих диаграммах площади фигур, эквивалентные:
 - техническим работам сжатия и расширения; работе цикла ГТД;
 - количеству теплоты, подведённому к рабочему телу в цикле ГТД и отведённому в окружающую среду.
4. В пояснительной записке привести алгоритм и результаты расчёта цикла ГТД и основных параметров теплообменного аппарата.
5. Привести список литературы.

Таблица 2

Исходные данные для выполнения контрольного задания

Номер варианта	T_1 , К	π	Δ	σ_p	G , кг/с	c_1/c_2 , м/с	b_1/b_2 , мм
1	2	3	4	5	6	7	8
46, 00	288	5	3.646	0.55	20	100/60	20/10
47, 01	288	6	3.819	0.56	22	95/60	22/12
48, 02	288	7	3.993	0.57	24	90/55	24/14
49, 03	288	8	4.166	0.58	26	85/50	26/16
50, 04	288	9	4.340	0.59	28	80/45	28/16
51, 05	288	10	4.514	0.60	20	75/40	20/16
52, 06	288	11	4.687	0.61	22	80/45	18/16
53, 07	288	12	4.861	0.62	24	85/50	16/16
54, 08	288	13	5.035	0.63	26	90/55	14/14
55, 09	288	14	5.382	0.64	28	95/60	16/12
56, 10	288	15	5.555	0.65	30	100/65	16/16
57, 11	300	16	5.500	0.66	32	95/60	18/18
58, 12	300	17	5.583	0.67	34	90/55	20/18
59, 13	300	18	5.666	0.68	36	80/50	22/22
60, 14	300	19	5.917	0.69	38	75/45	24/24
61, 15	300	20	6.000	0.70	40	80/50	20/20
62, 16	300	19	6.166	0.71	42	85/55	18/18
63, 17	300	18	6.333	0.72	44	90/60	16/16
64, 18	300	17	6.500	0.73	46	95/65	14/14
65, 19	300	16	6.666	0.74	48	100/65	16/16
66, 20	300	15	6.500	0.75	50	95/40	18/18
67, 21	295	14	6.333	0.76	48	90/45	20/20
68, 22	295	13	6.166	0.77	46	85/50	18/18
69, 23	295	12	6.000	0.78	44	80/55	18/16
70, 24	295	11	5.917	0.79	42	75/60	20/8
71, 25	295	10	5.666	0.80	40	80/65	22/8
72, 26	295	9	5.583	0.79	38	85/60	24/8
73, 27	295	8	5.500	0.78	36	90/65	22/10
74, 28	295	7	5.555	0.77	34	95/60	24/10
75, 29	295	6	5.382	0.76	32	100/55	20/18
76, 30	295	5	5.035	0.75	30	95/40	18/16
77, 31	280	6	4.861	0.74	28	90/45	18/8
78, 32	280	7	4.687	0.73	26	85/50	18/10
79, 33	280	8	4.514	0.72	24	80/45	20/12
80, 34	280	9	4.340	0.71	22	75/40	22/14
81, 35	280	10	4.166	0.70	20	70/35	24/16

Продолжение табл.2

1	2	3	4	5	6	7	8
82, 36	280	11	4.340	0.69	28	75/40	24/18
83, 37	280	12	4.514	0.68	26	80/45	24/20
84, 38	280	13	4.687	0.67	24	85/50	24/10
85, 39	280	14	4.861	0.66	22	90/55	22/8
86, 40	280	15	5.035	0.65	20	95/60	20/10
87, 41	275	16	5.382	0.64	28	100/65	18/12
88, 42	275	17	5.555	0.63	20	110/60	18/8
89, 43	275	18	5.500	0.62	22	105/55	16/10
90, 44	275	19	5.583	0.61	24	100/50	14/12
91, 45	275	20	5.666	0.60	26	95/45	12/12
92, 99	275	19	5.917	0.59	28	90/40	14/14
93, 98	275	18	6.000	0.58	20	85/35	16/10
94, 97	275	17	6.166	0.57	22	80/30	16/12
95, 96	275	16	6.333	0.56	24	85/40	18/14

Таблица 3

Физические параметры сухого воздуха при давлении 760 мм рт.ст.

T, K	t, oC	ρ , $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	c_p , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{K}}$	$\lambda \cdot 10^2$, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{K}}$	$a \cdot 10^5$, $\frac{\text{м}^2}{\text{с}}$	$\mu \cdot 10^6$, $\frac{\text{Н}\cdot\text{с}}{\text{м}^2}$	$\nu \cdot 10^6$, $\frac{\text{м}^2}{\text{с}}$	Pr
273	0	1.293	1.005	2.44	1.881	17.17	13.28	0.707
283	10	1.247	1.005	2.51	2.006	17.66	14.16	0.705
293	20	1.205	1.005	2.59	2.142	18.15	15.06	0.703
303	30	1.165	1.005	2.67	2.286	18.64	16.00	0.701
313	40	1.128	1.005	2.76	2.431	19.13	16.96	0.699
323	50	1.093	1.005	2.83	2.572	19.62	17.95	0.698
333	60	1.060	1.005	2.90	2.720	20.11	18.97	0.696
343	70	1.029	1.009	2.97	2.856	20.60	20.02	0.694
353	80	1.000	1.009	3.05	3.020	21.09	21.09	0.692
363	90	0.972	1.009	3.13	3.189	21.48	22.10	0.690
373	100	0.946	1.009	3.21	3.364	21.88	23.13	0.688
393	120	0.898	1.009	3.34	3.684	22.86	25.45	0.686
413	140	0.854	1.013	3.49	4.034	23.74	27.80	0.684
433	160	0.815	1.017	3.64	4.389	24.52	30.09	0.682
453	180	0.779	1.022	3.78	4.750	25.31	32.49	0.681
473	200	0.776	1.026	3.93	5.136	26.00	34.85	0.680
523	250	0.674	1.038	4.27	6.100	27.37	40.61	0.677
573	300	0.615	1.047	4.61	7.156	29.72	48.33	0.674
623	350	0.566	1.059	4.91	8.187	31.39	55.46	0.676
673	400	0.524	1.068	5.21	9.312	33.06	63.09	0.678
773	500	0.456	1.093	5.74	11.53	36.20	79.38	0.687
873	600	0.404	1.114	6.22	13.83	39.14	96.89	0.699
973	700	0.362	1.136	6.71	16.34	41.79	115.4	0.796
1073	800	0.329	1.156	7.18	18.88	44.34	134.8	0.713
1173	900	0.301	1.172	7.63	21.62	46.70	155.1	0.717
1273	1000	0.277	1.185	8.07	24.59	49.05	177.1	0.719
1373	1100	0.257	1.198	8.50	27.63	51.21	193.3	0.722
1473	1200	0.239	1.210	9.15	31.65	53.46	223.7	0.724

