

**Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)»**

УТВЕРЖДЕНО

директор института -
заместитель директора ФАКТ
М.А. Кудров

| | |
|----------------------------|--|
| | Рабочая программа дисциплины (модуля) |
| по дисциплине: | Теплообмен в воздушно-реактивных двигателях |
| по направлению: | Прикладные математика и физика |
| профиль подготовки: | Авиационные технологии |
| | Физтех-школа авиационных и цифровых технологий |
| | кафедра силовых установок |
| курс: | 1 |
| квалификация: | магистр |

Семестры, формы промежуточной аттестации:

1 (осенний) - Дифференцированный зачет
2 (весенний) - Экзамен

Аудиторных часов: 60 всего, в том числе:

лекции: 30 час.

семинары: 30 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 45 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 135, всего зач. ед.: 3

Программу составил: С.Ю. Крашенинников, д-р техн. наук, профессор

Программа обсуждена на заседании кафедры силовых установок 05.03.2025

Аннотация

Дисциплина "Теплообмен в воздушно-реактивных двигателях" направлена на построение и содержание курса ориентировано на то, чтобы дать будущим инженерам общие представления о процессах теплообмена. В то же время для тех, кто будет в дальнейшем специализироваться на задачах теплообмена, курс является необходимой базой при освоении методов и подходов в решении прикладных задач теплообмена в ВРД.

1. Цели и задачи

Цель дисциплины

- построение и содержание курса ориентировано на то, чтобы дать будущим инженерам общие представления о процессах теплообмена в условиях, соответствующих рабочему процессу в воздушно-реактивных двигателях (ВРД).

Задачи дисциплины

- формирование у студентов базовых знаний в области теплообмена;
- приобретение теоретических и инженерных знаний в области описания процессов теплообмена в воздушно-реактивных двигателях;
- оказание консультаций и помощи студентам в получении представлений о роли теплообмена в рабочем процессе и особенностях конструкции авиационного двигателя.

2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

| Код и наименование компетенции | Индикаторы достижения компетенции |
|---|--|
| ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук | ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области физико-математических наук |
| ОПК-4 Способен успешно реализовывать решение поставленной задачи, провести анализ результата и представить выводы, применяя знания и навыки в области физико-математических наук и информационно-коммуникационных технологий | ОПК-4.2 Способен применять знания в области физико-математических наук для решения поставленной задачи, формулирования выводов и оценки полученных результатов |
| ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты | ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности |

3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

- основные закономерности, описывающие перенос тепла при взаимодействии горячего потока с поверхностью.

уметь:

- использовать основные соотношения, описывающие перенос тепла при взаимодействии потока со стенкой, пользоваться соответствующей литературой.

владеть:

- приемами выбора постановки задачи для конкретных расчетов.

4. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий

4.1. Разделы дисциплины (модуля) и трудоемкости по видам учебных занятий

| № | Тема (раздел) дисциплины | Трудоемкость по видам учебных занятий, включая самостоятельную работу, час. | | | |
|-----------------------|---|---|----------|-----------------|----------------|
| | | Лекции | Семинары | Лаборат. работы | Самост. работа |
| 1 | Введение. Анализ размерностей | 2 | 2 | | |
| 2 | Авиационный двигатель - тепловая машина. Мощность и тяга двигателя, термодинамический и пропульсивный КПД | 2 | 2 | | |
| 3 | Задача Польгаузена | 1 | 1 | | 3 |
| 4 | Общие решения и постановка задач для распределения температур | 2 | 2 | | |
| 5 | Связь между распределениями температур и скоростей | 1 | 1 | | |
| 6 | Теплопередача в движущихся средах при учете диссипации | 2 | 2 | | |
| 7 | Теплопередача в движущихся средах. Уравнение энергии в гидродинамике | 1 | 1 | | 5 |
| 8 | Теплопередача в неподвижной среде, закон Фурье | 1 | 1 | | 4 |
| 9 | Теплопередача при наличии эффектов конвенции | 1 | 1 | | 3 |
| 10 | Условие сохранения тепла. Применимость решений, релаксация | 2 | 2 | | |
| 11 | Охлаждение с выдувом охлаждающего газа | 1 | 1 | | 2 |
| 12 | Законы излучения для твердого тела и газа. Длина свободного пробега излучения | 1 | 1 | | |
| 13 | Критериальные зависимости для теплообмена в пограничном слое | 1 | 1 | | 2 |
| 14 | Лучистый теплообмен. Лучистые потоки энергии | 2 | 2 | | 14 |
| 15 | Обтекание цилиндра, зависимость C_w (Re) | 1 | 1 | | 2 |
| 16 | Определяющая роль структуры течения в задачах теплообмена | 1 | 1 | | 2 |
| 17 | Оребренная труба – теплообмен и трение. | 2 | 2 | | 2 |
| 18 | Примеры реализации теплообменных систем | 2 | 2 | | 2 |
| 19 | Процессы переноса в турбулентном пограничном слое | 1 | 1 | | 2 |
| 20 | Распределение температуры, влияние чисел Pr и Prt | 1 | 1 | | 2 |
| 21 | Струйное заградительное охлаждение | 2 | 2 | | |
| Итого часов | | 30 | 30 | | 45 |
| Подготовка к экзамену | | 30 час. | | | |
| Общая трудоёмкость | | 135 час., 3 зач.ед. | | | |

4.2. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам)

1. Введение. Анализ размерностей

Анализ размерностей для случая $\rho = \text{const}$, числа Nu , Re , Pr .

2. Авиационный двигатель - тепловая машина. Мощность и тяга двигателя, термодинамический и пропульсивный КПД

Авиационный двигатель - тепловая машина. Мощность и тяга двигателя, термодинамический и пропульсивный КПД. Связь КПД с основными термодинамическими параметрами. Циклы Карно и Брайтона. Коэффициент избытка воздуха и уровни температур в элементах ВРД. Основные принципы охлаждения элементов ВРД. Термоциклы. Две постановки задачи охлаждения.

3. Задача Польгаузена

Задача Польгаузена о вертикальной стенке. Движение среды и тепловой поток.

4. Общие решения и постановка задач для распределения температур

Общие решения и постановка задач для стационарного и нестационарного распределения температур. Задача о ступеньке температуры и мгновенном точечном источнике.

5. Связь между распределениями температур и скоростей

Связь между распределениями температур и скоростей. Задача о термометре, коэффициент восстановления. Задача об охлаждении (нагреве) стенки.

6. Теплопередача в движущихся средах при учете диссипации

Теплопередача в движущихся средах при учете диссипации. Различие диссипационных процессов при числах Re . Течение Пуазейля. Течение Куэтта, критерий Эккерта.

7. Теплопередача в движущихся средах. Уравнение энергии в гидродинамике

Теплопередача в движущихся средах. Уравнение энергии в гидродинамике. Постановка задач переноса тепла при использовании уравнений для сжимаемой и несжимаемой среды. Система уравнений динамики и теплопереноса при числах Маха.

8. Теплопередача в неподвижной среде, закон Фурье

Теплопередача в неподвижной среде, закон Фурье. Закон Ньютона-Рихмана. Уравнение теплопроводности для неподвижной среды.

9. Теплопередача при наличии эффектов конвекции

Теплопередача при наличии эффектов конвекции. Появление архимедовых сил и уравнения движения с учетом архимедовых сил. Постановка задачи для описания динамики среды при малых изменениях плотности. Критерии Рэлея (R) и Грасгофа (Gr).

10. Условие сохранения тепла. Применимость решений, релаксация

Условие сохранения тепла. Применимость решений, релаксация. Ламинарный пограничный слой без диссипации, эффективность протяженности охлаждаемых поверхностей.

11. Охлаждение с выдувом охлаждающего газа

Заградительное (пленочное) охлаждение с выдувом охлаждающего газа.

12. Законы излучения для твердого тела и газа. Длина свободного пробега излучения

Законы излучения для твердого тела и газа. Длина свободного пробега излучения. Особенности теплового состояния полостей с излучающим газом.

13. Критериальные зависимости для теплообмена в погранслое

Критериальные зависимости для теплообмена в погранслое, их аналогия с данными для трения: шероховатость, турбулентность. Влияние числа Pr и перехода к турбулентности на теплообмен. Качественный анализ теплообмена на аэродинамическом профиле.

14. Лучистый теплообмен. Лучистые потоки энергии

Лучистый теплообмен. Лучистые потоки энергии, яркость, интенсивность. Процессы отражения и поглощения.

15. Обтекание цилиндра, зависимость $C_w(Re)$

Обтекание цилиндра, зависимость $C_w(Re)$. Определение числа Nu при обтекании цилиндра, зависимость $Nu(Re)$ и $Nu(Re, \epsilon)$ при обтекании цилиндра.

16. Определяющая роль структуры течения в задачах теплообмена

Определяющая роль структуры течения в задачах теплообмена. Температурный пограничный слой, соотношение между тепловым и динамическим слоями. «Аналогия Рейнольдса», цена интенсификации теплообмена, охлаждение лопатки турбины.

17. Оребренная труба – теплообмен и трение.

Описание оребренной трубы и теплообмена между трубой, описание силы трения.

18. Примеры реализации теплообменных систем

Примеры реализации теплообменных систем. Теплообмен при поперечном обтекании труб.

19. Процессы переноса в турбулентном пограничном слое

Процессы переноса в турбулентном пограничном слое. Динамическая задача: распределение параметров в пограничном слое, структура развитого турбулентного пограничного слоя, ламинарный подслой, «скорость трения», логарифмический участок профиля скорости, внешний слой.

20. Распределение температуры, влияние чисел Pr и Pr_t

Распределение температуры, влияние чисел Pr и Pr_t . Влияние шероховатости на динамические и тепловые параметры в погранслое.

21. Струйное заградительное охлаждение

Струйное заградительное охлаждение, анализ структуры течения на основе теории турбулентных струйных течений.

5. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю)

учебная аудитория, оснащенная мультимедиапроектором с ноутбуком и экраном, белой доской (она же – экран) и фломастерами для дополнительных пояснений.

6.Перечень рекомендуемой литературы

Основная литература

1. Теория авиационных двигателей [Текст]: теория лопаточных машин : учеб. для вузов; рек. Гос. ком. РФ / П. К. Казанджан, Н. Д. Тихонов; под общ. ред. П. К. Казанджана. — 2-е изд., перераб. и доп. — М. : Машиностроение, 1995. — 320 с.
2. Механика сплошной среды [Текст] / А. А. Ильюшин. — М. : МГУ, 1971. — 248 с.
3. Теория пограничного слоя [Текст] : [учеб. пособие для вузов] / Г. Шлихтинг ; пер. с нем. Г. А. Вольперта ; под ред. Л. Г. Лойцянского. — 6-е изд. — М. : Наука, 1974. — 711 с.
4. Теория турбулентных струй [Текст]/под ред. Г. Н. Абрамовича, -М., Наука, 1984

Дополнительная литература

1. Конвективный перенос в теплообменниках [Текст]/А. А. Жукаускас, -М., Наука, 1982
2. Теплопередача [Текст] : учебник для вузов / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел. — 3-е изд., перераб. и доп. — М. : Энергия, 1975. — 486 с.

7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины (модуля)

Не используются

8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень необходимого программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)

На лекционных занятиях используются мультимедийная технология, основанная на демонстрации презентаций.

9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины (модуля)

Студент, изучающий дисциплину "Теплообмен в воздушно-реактивных двигателях", должен с одной стороны, овладеть общим понятийным аппаратом, а с другой стороны, должен научиться применять теоретические знания на практике.

В результате изучения дисциплины студент должен знать основные определения, понятия, аксиомы.

Успешное освоение курса требует напряжённой самостоятельной работы студента. В программе курса приведено минимально необходимое время для работы студента над темой. Самостоятельная работа включает в себя:

- чтение и конспектирование рекомендованной литературы;
- проработку учебного материала (по конспектам лекций, учебной и научной литературе), подготовку ответов на вопросы, предназначенных для самостоятельного изучения, доказательство отдельных утверждений, свойств;
- подготовку к дифференцированному зачету и экзамену.

Руководство и контроль за самостоятельной работой студента осуществляется в форме индивидуальных консультаций.

Важно добиться понимания изучаемого материала, а не механического его запоминания. При затруднении изучения отдельных тем, вопросов, следует обращаться за консультациями к лектору.

В осеннем семестре контроль производится в форме дифференцированного зачета, в весеннем семестре в форме экзамена.

ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)

| | |
|----------------------------|---|
| по направлению: | Прикладные математика и физика |
| профиль подготовки: | Авиационные технологии Физтех-школа авиационных и цифровых технологий кафедра силовых установок |
| курс: | <u>1</u> |
| квалификация: | магистр |

Семестры, формы промежуточной аттестации:

- 1 (осенний) - Дифференцированный зачет
- 2 (весенний) - Экзамен

Разработчик: С.Ю. Крашенинников, д-р техн. наук, профессор

1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

| Код и наименование компетенции | Индикаторы достижения компетенции |
|---|--|
| ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук | ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области физико-математических наук |
| ОПК-4 Способен успешно реализовывать решение поставленной задачи, провести анализ результата и представить выводы, применяя знания и навыки в области физико-математических наук и информационно-коммуникационных технологий | ОПК-4.2 Способен применять знания в области физико-математических наук для решения поставленной задачи, формулирования выводов и оценки полученных результатов |
| ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты | ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности |

2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Теплообмен в воздушно-реактивных двигателях» обучающийся должен:

знать:

- основные закономерности, описывающие перенос тепла при взаимодействии горячего потока с поверхностью.

уметь:

- использовать основные соотношения, описывающие перенос тепла при взаимодействии потока со стенкой, пользоваться соответствующей литературой.

владеть:

- приемами выбора постановки задачи для конкретных расчетов.

3. Перечень типовых (примерных) вопросов, заданий, тем для подготовки к текущему контролю

1. Течение при свободной конвекции. Числа Рэлея (R) и Грасгофа (Gr).
2. Задача Польшаузена о вертикальной стенке.
3. Определяющие параметры и критерии в задачах теплообмена для несжимаемой жидкости.
4. Температурный пограничный слой, соотношение между тепловым и динамическим слоями.
5. «Аналогия Рейнольдса», цена интенсификации теплообмена.
6. Связь между распределениями температур и скоростей в ламинарном пограничном слое.
7. Задача о термометре.
8. Задача об охлаждении (нагреве) стенки.
9. Обтекание цилиндра, зависимость C_w (Re).
10. Определение числа Nu при обтекании цилиндра, зависимость Nu (Re).

4. Перечень типовых (примерных) вопросов и тем для проведения промежуточной аттестации обучающихся

Вопросы для дифференцированного зачета:

1. Авиационный двигатель – тепловая машина. Циклы Карно и Брайтона, коэффициент избытка воздуха, уровни температур в элементах ВРД.
2. Авиационный двигатель - связь между КПД и основными термодинамическими и газодинамическими параметрами.
3. Основные принципы охлаждения. Термоциклы. Две постановки задачи охлаждения.

4. Закон Фурье, коэффициент теплопередачи, закон Ньютона-Рихмана.
5. Уравнение теплопроводности для неподвижной среды.
6. Постановка задач для уравнения теплопроводности. Интеграл Пуассона.
7. Задачи о ступеньке температуры и мгновенном источнике. Применимость решений, релаксация.
8. Уравнение энергии в гидродинамике.
9. Постановка задач переноса тепла при использовании уравнений гидродинамики.
10. Перенос тепла в несжимаемой жидкости, $M \ll 1$.

Вопросы для экзамена:

1. Анализ размерностей для случая $\rho = \text{const}$, числа Nu , Re , Pr .
2. Ламинарный пограничный слой без диссипации, эффективность протяженности охлаждающих поверхностей.
3. Влияние диссипации на теплоперенос при $Re \rightarrow 0$ и $Re \rightarrow \infty$.
4. Распределение температуры для течения Пуазейля.
5. Течение Куэтта, критерий Ec – Эккерта.
6. $Nu()$ при обтекании цилиндра.
7. Процессы переноса в турбулентном пограничном слое. Динамическая задача: а) распределение параметров в пограничном слое, связь трения, k -та сопротивления и параметров подобия; б) Тепловая задача, влияние числа Pr .
8. Влияние турбулентности и других факторов на динамические и тепловые параметры в погранслое.
9. Критериальные зависимости для теплообмена в погранслое, их аналогия с данными для трения; шероховатость, турбулентность.
10. Качественный анализ теплообмена на аэродинамическом профиле.

Билет 1

1. Теплообмен при поперечном обтекании труб.
2. Оребренная труба – теплообмен и трение.

Билет 2

1. Заградительное охлаждение с выдувом охлаждающего газа.
2. Струйное заградительное охлаждение.

Билет 3

1. Лучистый теплообмен. Лучистые потоки энергии.
2. Законы излучения для твердого тела и газа. Длина свободного пробега излучения.

Критерии оценивания

Оценка отлично 10 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины, проявляющему интерес к данной предметной области, продемонстрировавшему умение уверенно и творчески применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 9 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 8 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, правильное обоснование принятых решений, с некоторыми недочетами.

Оценка хорошо 7 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но недостаточно грамотно обосновывает полученные результаты.

Оценка хорошо 6 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности.

Оценка хорошо 5 баллов - выставляется студенту, если он в основном знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач достаточно большое количество неточностей.

Оценка удовлетворительно 4 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, но при этом он освоил основные разделы учебной программы, необходимые для дальнейшего обучения, и может применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации.

Оценка удовлетворительно 3 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, допускающему ошибки в формулировках базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, слабо владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и с трудом применяет полученные знания даже в стандартной ситуации.

Оценка неудовлетворительно 2 балла - выставляется студенту, который не знает большей части основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных принципов и не умеет использовать полученные знания при решении типовых задач.

Оценка неудовлетворительно 1 балл - выставляется студенту, который не знает основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубейшие ошибки в формулировках базовых понятий дисциплины и вообще не имеет навыков решения типовых практических задач.

5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности

Во время проведения экзамена обучающиеся могут пользоваться программой дисциплины, а также справочной литературой, вычислительной техникой, конспектами лекций.

Дифференцированный зачет проводится путем организации специального опроса, проводимого в устной форме.