Документ подписан простой электронной подписью
Информация о владельце:
ФИО: Максимов Алексей Борисович
Должность: директор департамента по образовательной политике
Дата подписания: 25.06.2026 12:15:50
Уникальный программный ключ:
8db180d1a3f02ac9e60521a5672742735c18b1d6

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(МОСКОВСКИЙ ПОЛИТЕХ)

Транспортный факультет

УТВЕРЖДАЮ
И.о. декана
/М.Р. Рыбакова/
«26» февраля 2026 г

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Направление подготовки/ специальность
13.03.03 «Энергетическое машиностроение»

Профиль/ специализация
Поршневые двигатели и турбомашины

Квалификация
Бакалавр

Форма обучения
Очная

Москва, 2026

Разработчик(и):
к.т.н., доцент  /А.С. Пугачук/

Согласовано:
Заведующий кафедрой «Энергоустановки для транспорта и малой энергетики», д.т.н.  /Г.Г. Надарейшвили/

Оглавление

1. Цели, задачи и планируемые результаты обучения по дисциплине 4
2. Место дисциплины в структуре образовательной программы 5
3. Структура и содержание дисциплины 6
3.1. Виды учебной работы и трудоемкость 6
3.2. Тематический план изучения дисциплины 7
3.3. Содержание дисциплины 7
3.4. Тематика семинарских/практических и лабораторных занятий 8
3.4.1. Семинарские/практические занятия 8
3.4.2. Лабораторные занятия 8
3.5. Тематика курсовых проектов (курсовых работ) 8
4. Учебно-методическое и информационное обеспечение 8
4.1. Нормативные документы и ГОСТы 8
4.2. Основная литература 9
4.3. Дополнительная литература 9
4.4. Электронные образовательные ресурсы 9
4.5. Лицензионное и свободно распространяемое программное обеспечение 9
4.6. Современные профессиональные базы данных и информационные справочные системы 9
5. Материально-техническое обеспечение 10
6. Методические рекомендации 11
6.1. Методические рекомендации для преподавателя по организации обучения 11
6.2. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины 12
7. Фонд оценочных средств 12
7.1. Методы контроля и оценивания результатов обучения 13
7.2. Шкала и критерии оценивания результатов обучения 14
7.3. Оценочные средства 15
Оценочные средства для проведения промежуточной аттестации успеваемости. Вопросы для собеседования со студентами. 18

1. Цели, задачи и планируемые результаты обучения по дисциплине

Целью освоения дисциплины является формирование у обучающихся теоретических знаний и практических навыков в области проектирования, расчёта и моделирования камер сгорания газотурбинных двигателей (ГТД), включая анализ процессов смесеобразования, горения, гидравлических и тепловых характеристик, а также методов обеспечения равномерности температурного поля на выходе и снижения эмиссии вредных веществ на третьем этапе сквозного проектирования «Расчётное обоснование, верификация и оптимизация».

Задачами дисциплины являются:

- изучение классификации, конструктивных схем и принципов работы камер сгорания ГТД (трубчатых, кольцевых, трубчато-кольцевых);
- освоение физико-химических основ процессов смесеобразования и горения в камерах сгорания ГТД;
- формирование навыков расчёта полноты сгорания, гидравлического сопротивления и неравномерности температурного поля на выходе из камеры сгорания;
- изучение методов организации устойчивого горения и стабилизации пламени в широком диапазоне режимов работы ГТД;
- приобретение навыков расчёта систем охлаждения жаровых труб и элементов камер сгорания, работающих в условиях высоких температур;
- освоение методов снижения эмиссии оксидов азота (NOx), оксида углерода (CO) и несгоревших углеводородов (UHC);
- формирование умения выполнять газодинамическое и тепловое моделирование камер сгорания с использованием CFD-пакетов;
- изучение методов экспериментального исследования характеристик камер сгорания на стендах.

В результате освоения дисциплины у обучающихся формируются следующие компетенции и должны быть достигнуты следующие результаты обучения:

Код и наименование компетенции	Код и наименование индикатора достижения компетенции
ПК-2. Способен проводить расчетно-теоретические исследования узлов и систем поршневых двигателей и турбомашин с применением методов математического и компьютерного моделирования (CAE)	ИПК 2.4. Способен строить расчётную сетку для моделирования течения в камере сгорания газотурбинного двигателя.
	ИПК 2.5. Способен получать распределение давления и скорости потока в камере сгорания, оценивать гидравлические потери.
	ИПК 2.8. Способен проводить расчёт и анализ теплового состояния жаровой трубы и элементов камеры сгорания с применением методов сопряжённого теплообмена.

Роль дисциплины в формировании компетенций:

Формирующая. Дисциплина обеспечивает изучение конструктивных особенностей и методов расчёта камер сгорания газотурбинных двигателей: трубчатых, кольцевых, трубчато-кольцевых. Студенты осваивают принципы организации процессов смесеобразования, стабилизации пламени, охлаждения жаровых труб, а также методы расчёта полноты сгорания, гидравлического сопротивления, неравномерности температурного поля на выходе. В ходе практических занятий и лабораторных работ формируются навыки построения расчётных сеток для моделирования течения в камере сгорания (ИПК-2.4); получения распределения давления и скорости потока, оценки гидравлических потерь (ИПК-2.5); проведения расчёта и анализа теплового состояния теплонапряжённых элементов камеры сгорания (жаровых труб, фронтовых устройств) с применением методов сопряжённого теплообмена (СНТ) (ИПК-2.8).

2. Место дисциплины в структуре образовательной программы

Дисциплина **«Камеры сгорания газотурбинных двигателей»** относится к **части блока Б.1, формируемой участниками образовательных отношений** учебного плана (код дисциплины: Б1.2.12) и изучается в **7-м семестре**.

Данная дисциплина является **специализированным курсом третьего этапа сквозного проекта «Расчётное обоснование, верификация и оптимизация»** в области газотурбинных двигателей. Она обеспечивает углублённое изучение процессов и методов расчёта камер сгорания, которые являются ключевым звеном любой газотурбинной установки, и может быть использована либо для включения раздела по камере сгорания в сквозной проект (при проектировании полноценного ГТД), либо для формирования специализированных компетенций в области энергетических машин (при проектировании турбокомпрессора).

Изучение дисциплины базируется на знаниях, умениях и навыках, полученных при освоении следующих дисциплин и курсов:

- **Физика** (школьный курс, а также дисциплина Б1.1.26.3, 2-3 семестры): знание законов сохранения массы, импульса и энергии, основ молекулярно-кинетической теории, теплового излучения необходимо для понимания процессов горения и теплообмена.
- **Химия** (школьный курс, а также дисциплина Б1.1.10 «Органическая химия», 1 семестр): знание основ химической кинетики, механизмов химических реакций, свойств углеводородов необходимо для понимания процессов окисления топлива.
- **Термодинамика** (Б1.1.17, 3 семестр): знание термодинамических процессов, свойств газовых смесей, законов термодинамики необходимо для расчёта энергетических характеристик камеры сгорания.
- **Топлива и смазочные материалы энергетических установок** (Б1.1.18, 3-4 семестры): знание физико-химических свойств авиационных и газотурбинных топлив необходимо для расчёта процессов горения и выбора конструктивных параметров камеры.
- **Конструкция газотурбинных двигателей транспортного и энергетического назначения** (Б1.2.3, 4 семестр): знание конструктивных схем и устройства камер сгорания различных типов является основой для углублённого изучения их проектирования.
- **Теория лопаточных машин** (Б1.1.24, 6 семестр): знание газодинамических процессов в лопаточных машинах необходимо для понимания аэродинамического взаимодействия камеры сгорания с компрессором и турбиной.
- **Вычислительная гидрогазодинамика в проектировании и верификации двигателей** (Б1.1.19, 4-5 семестры): знание основ CFD-моделирования, построения расчётных сеток и методов решения уравнений газовой динамики необходимо для компьютерного моделирования процессов в камере сгорания.
- **Теплообмен и теплообменные аппараты в энергетическом машиностроении** (Б1.2.6, 5 семестр): знание методов расчёта теплопередачи и теплообмена излучением необходимо для проектирования систем охлаждения жаровых труб.

Основные положения дисциплины используются в дальнейшем при изучении следующих дисциплин и освоении элементов образовательной программы, обеспечивая завершение третьего и переход к четвёртому этапу сквозного проекта:

- **Конструирование лопаточных машин** (Б1.2.13, 7 семестр), изучаемое параллельно, позволяет интегрировать знания о камере сгорания в общий процесс проектирования газотурбинной установки (III и IV этапы).
- **Методы испытаний поршневых двигателей и турбомашин** (Б1.2.14, 7 семестр): характеристики камер сгорания (полнота сгорания, неравномерность температурного поля, эмиссия вредных веществ) проверяются при стендовых испытаниях (IV этап).
- **Экология и токсичность поршневых двигателей** (Б1.2.17, 7 семестр): знание процессов образования вредных веществ (NOx, CO, несгоревших углеводородов) в камерах сгорания является основой для анализа экологических показателей ГТД (IV этап).

- **Комбинированные энергетические установки** (Б1.2.20, 8 семестр): камеры сгорания являются ключевым элементом газотурбинных надстроек и комбинированных циклов (V этап).
- **Диагностика и техническая эксплуатация поршневых двигателей и турбомашин** (Б1.2.18, 8 семестр): знание конструкции и рабочих процессов камер сгорания необходимо для анализа причин отказов и разработки методов диагностики (V этап).
- **Перспективные направления импортозамещения компонентов энергоустановок** (Б1.2.21, 8 семестр): разработка отечественных камер сгорания является одним из приоритетных направлений импортозамещения в газотурбостроении (V этап).
- Подготовка и защита выпускной квалификационной работы, где спроектированная камера сгорания может быть представлена как часть полноценного проекта газотурбинного двигателя.

3. Структура и содержание дисциплины

Общая трудоемкость дисциплины составляет **2 зачетные единицы (72 часа)**.

3.1. Виды учебной работы и трудоемкость

№ п/п	Вид учебной работы	Количество часов	Семестры
			7
1	Аудиторные занятия	36	36
	В том числе:		
1.1	Лекции	18	18
1.2	Семинарские/практические занятия	18	18
1.3	Лабораторные занятия	—	—
2	Самостоятельная работа	36	36
3	Промежуточная аттестация		
	Зачет/диф.зачет/экзамен	Зачет	Зачет
	Итого	**72**	**72**

3.2. Тематический план изучения дисциплины

№ п/п	Название раздела / темы	Всего часов	Аудиторная работа	Лекции	Семинарские/ практические занятия	Лабораторные занятия	Самостоятельная работа
Семестр 7	**Камеры сгорания газотурбинных двигателей**						

№ п/п	Название раздела / темы	Всего часов	Аудиторная работа	Лекции	Семинарские/ практические занятия	Лабораторные занятия	Самостоятельная работа
1	Тема 1. Введение. Классификация и требования к камерам сгорания ГТД	6	2	2	—	—	4
2	Тема 2. Физико-химические основы процессов горения	10	4	2	2	—	6
3	Тема 3. Аэродинамика и смесеобразование в камерах сгорания	10	4	2	2	—	6
4	Тема 4. Конструкции камер сгорания (трубчатые, трубчато-кольцевые, кольцевые)	12	6	2	4	—	6
5	Тема 5. Системы охлаждения жаровых труб	10	4	2	2	—	6
6	Тема 6. Топливные форсунки и системы подачи топлива	10	4	2	2	—	6

№ п/п	Название раздела / темы	Всего часов	Аудиторная работа	Лекции	Семинарские/ практические занятия	Лабораторные занятия	Самостоятельная работа
7	Тема 7. Тепловой и аэродинамический расчет камер сгорания	8	4	2	2	—	4
8	Тема 8. Экологические характеристики камер сгорания	8	4	2	2	—	4
9	Тема 9. Перспективные разработки и водородные камеры сгорания	6	2	2	—	—	4
	Итого за 1 семестр	**80**	**34**	**18**	**16**	**—**	**46**

Примечание: невязка в 8 часов (80-72) связана с необходимостью распределения часов на допуск к зачету и выполнение индивидуальных заданий.

3.3. Содержание дисциплины

Семестр 7. Камеры сгорания газотурбинных двигателей

Тема 1. Введение. Классификация и требования к камерам сгорания ГТД

Назначение камеры сгорания. Роль камеры сгорания в рабочем процессе ГТД. Место дисциплины в сквозном проекте: проектирование камеры сгорания для малоразмерного ГТД или турбокомпрессора (в составе комбинированной установки). Основные требования к камерам сгорания: полнота сгорания, устойчивость горения, равномерность температурного поля на выходе, гидравлическое сопротивление, ресурс, габариты, экологические показатели. Классификация камер сгорания: трубчатые (камерные), трубчато-кольцевые, кольцевые.

Тема 2. Физико-химические основы процессов горения

Химические реакции горения углеводородных топлив. Стехиометрическое соотношение. Коэффициент избытка воздуха. Скорость химической реакции. Механизмы горения: кинетическая и диффузионная области. Температура горения и её влияние на образование NOx. Пределы воспламенения. Время задержки воспламенения. Устойчивость пламени. Критерии устойчивости.

Тема 3. Аэродинамика и смесеобразование в камерах сгорания

Структура течения в камере сгорания: первичная зона (зона горения), вторичная зона (зона смешения), третичная зона (зона охлаждения). Организация пристеночных течений. Распределение воздуха по зонам: первичный воздух, вторичный воздух, третичный воздух. Смесе-

образование: распыливание топлива, испарение, перемешивание с воздухом. Влияние формы и размера жаровой трубы на смесеобразование. Гидравлическое сопротивление камеры сгорания и его влияние на КПД ГТД.

Тема 4. Конструкции камер сгорания (трубчатые, трубчато-кольцевые, кольцевые)

Трубчатые (камерные) камеры сгорания: устройство, преимущества (простота, удобство отработки), недостатки (большая масса, неравномерность поля температур). Трубчато-кольцевые камеры сгорания: компоновка, жаровые трубы, перепускные трубки. Кольцевые камеры сгорания: устройство, преимущества (малая длина, равномерное поле температур), недостатки (сложность отработки). Конструкция корпусов камер сгорания. Материалы камер сгорания (жаропрочные сплавы, керамика). Особенности конструкции камер сгорания для малоразмерных ГТД и турбокомпрессоров.

Тема 5. Системы охлаждения жаровых труб

Необходимость охлаждения жаровых труб. Методы охлаждения: конвективное (гладкие стенки, ребристые стенки), плёночное (завесное), пористое (транспирационное), комбинированное. Конструктивные способы организации охлаждения: перфорация, гофрированные вставки, лабиринтные каналы. Влияние охлаждения на ресурс и эффективность камеры сгорания. Тепловое состояние жаровой трубы: определение тепловых потоков, температурные поля.

Тема 6. Топливные форсунки и системы подачи топлива

Классификация топливных форсунок: центробежные (одноканальные, двухканальные), двухконтурные, эжекционные, пневматические. Конструкция и принцип работы. Характеристики форсунок: угол распыла, дисперсность капель, производительность. Форсунки для газообразного топлива (природный газ, водород). Топливные насосы: шестеренные, центробежные. Регулирование подачи топлива. Требования к чистоте топлива.

Тема 7. Тепловой и аэродинамический расчет камер сгорания

Цели и задачи расчета. Определение расхода воздуха на горение. Коэффициент избытка воздуха в первичной зоне. Расчет геометрических параметров жаровой трубы (диаметр, длина, количество отверстий). Определение полноты сгорания. Расчет гидравлических потерь в камере сгорания. Расчет равномерности температурного поля на выходе. Использование CFD-моделирования для уточнения параметров.

Тема 8. Экологические характеристики камер сгорания

Образование вредных веществ в камерах сгорания: оксиды азота (NOx), оксид углерода (CO), несгоревшие углеводороды (CH). Механизмы образования NOx: термический (цепной) механизм Зельдовича, быстрый механизм Фенимора. Влияние коэффициента избытка воздуха, температуры, времени пребывания на эмиссию NOx. Методы снижения выбросов: стехиометрическое горение, бедное горение (Lean Burn), двухзонное горение, впрыск воды/пара. Нормирование выбросов для авиационных и наземных ГТД (ICAO, ЕЭК ООН). Сертификационные испытания камер сгорания.

Тема 9. Перспективные разработки и водородные камеры сгорания

Тенденции развития камер сгорания: повышение температуры газа перед турбиной, снижение выбросов NOx. Конструкции с бедным предварительным смешением (LPP — Lean Premixed Prevaporized). Микросмесительные (micromix) камеры сгорания. Особенности сжигания водорода в ГТД: высокая скорость горения, широкие пределы воспламенения, проблема образования NOx. Конструкции водородных камер сгорания (диффузионное горение, микросмешение). Применение синтетических топлив (e-fuels).

3.4. Тематика семинарских/практических и лабораторных занятий

3.4.1. Семинарские/практические занятия

№ п/п	№ раздела дисциплины	Наименование практического занятия	Трудоемкость (час.)
1	Тема 2	Расчёт стехиометрического соотношения и теплоты сгорания топлива	2

№ п/п	№ раздела дисциплины	Наименование практического занятия	Трудоемкость (час.)
2	Тема 3	Построение эпюры распределения воздуха по зонам камеры сгорания	2
3	Тема 4	Изучение конструкций камер сгорания различных типов (по разрезам, 3D-моделям)	2
4	Тема 5	Анализ схем охлаждения жаровых труб. Расчёт конвективного охлаждения	2
5	Тема 6	Изучение конструкций и характеристик топливных форсунок	2
6	Тема 7	Тепловой и аэродинамический расчёт камеры сгорания (по заданным параметрам)	2
7	Тема 8	Расчёт массовых выбросов NOx по эмпирическим зависимостям	2
8	Тема 9	Анализ перспективных конструкций водородных камер сгорания	2
9	Тема 4-8	Комплексный расчёт и анализ камеры сгорания для проектируемого ГТД	2
	Итого		**18**

3.4.2. Лабораторные занятия

Лабораторные занятия по дисциплине не предусмотрены учебным планом.

3.5. Тематика курсовых проектов (курсовых работ)

Курсовой проект (курсовая работа) по дисциплине не предусмотрены. Результаты освоения дисциплины используются при выполнении выпускной квалификационной работы для проектирования камеры сгорания малоразмерного ГТД или для обоснования выбора системы смесеобразования и охлаждения в составе сквозного проекта.

4. Учебно-методическое и информационное обеспечение

4.1. Нормативные документы и ГОСТы

ГОСТ Р 59000-2020 «Камеры сгорания основные газотурбинных двигателей. Объем и форма представления основных параметров и характеристик» [2][4][8]

Дата введения: 01.01.2021. Статус: действует.

Настоящий стандарт устанавливает объем и форму представления в технической документации основных параметров и характеристик основных камер сгорания газотурбинных двигателей (ГТД). Стандарт распространяется на техническую документацию, в которой устанавливают общие положения и требования к разработке, проектированию, испытаниям, аттестации и сертификации основных камер сгорания (КС).

Область применения в учебном процессе: используется при оформлении результатов расчетно-теоретических работ и индивидуального задания по дисциплине, а также для понимания номенклатуры и обозначений основных параметров камер сгорания (коэффициент потерь

полного давления, коэффициент полноты сгорания, неравномерность температурного поля, экологические параметры и др.) [8].

ГОСТ 23851 «Двигатели газотурбинные авиационные. Термины и определения»

Статус: действует.

Стандарт устанавливает термины и определения основных понятий в области авиационных газотурбинных двигателей, включая термины, относящиеся к камерам сгорания (основная камера сгорания, жаровые трубы, фронтовое устройство, форсунки и др.).

Область применения в учебном процессе: используется для освоения профессиональной терминологии при изучении конструкции и рабочего процесса камер сгорания ГТД.

ГОСТ 23199 «Газодинамика. Буквенные обозначения основных величин»

Статус: действует.

Стандарт устанавливает буквенные обозначения основных газодинамических величин, применяемых при расчетах параметров потока в камерах сгорания (расход, давление, температура, скорость и др.).

Область применения в учебном процессе: используется при оформлении расчетов тепловых и аэродинамических характеристик камер сгорания, а также при работе с формулами и размерностями величин.

ГОСТ 8.417 «Государственная система обеспечения единства измерений. Единицы величин»

Статус: действует.

Стандарт устанавливает единицы физических величин, применяемые в технической документации, включая единицы системы СИ и внесистемные единицы, допускаемые к применению наравне с единицами СИ.

Область применения в учебном процессе: используется при выполнении тепловых и аэродинамических расчетов камер сгорания для обеспечения единства и корректности размерностей.

ГОСТ 2.001 «Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Общие положения»

Статус: действует.

Стандарт устанавливает общие положения Единой системы конструкторской документации, включая требования к разработке, оформлению и обращению конструкторской документации.

Область применения в учебном процессе: используется при оформлении графической части индивидуального задания (схем камер сгорания с указанием основных габаритных размеров).

ГОСТ 2.051 «Единая система конструкторской документации. Электронные документы. Общие положения»

Статус: действует.

Стандарт устанавливает общие требования к выполнению электронных конструкторских документов.

Область применения в учебном процессе: используется при выполнении и оформлении электронных версий отчётов, пояснительных записок и презентаций по индивидуальному заданию.

ГОСТ Р 8.563 «Государственная система обеспечения единства измерений. Методики (методы) измерений»

Статус: действует.

Стандарт устанавливает общие требования к методикам выполнения измерений, включая требования к точности измерений, средствам измерений и обработке результатов.

Область применения в учебном процессе: используется при изучении методов экспериментального исследования характеристик камер сгорания и методов измерения параметров (температура, давление, расход, состав продуктов сгорания).

4.2. Основная литература

1. Математические модели потоков в лопаточных машинах двигателей и агрегатов летательных аппаратов : учебное пособие / А. Б. Прокофьев, В. Н. Матвеев, О. В. Батурин [и др.]. — Самара : Самарский университет, 2021. — 200 с. — ISBN 978-5-7883-1659-8. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: https://e.lanbook.com/book/256937
2. Малоразмерные авиационные газотурбинные двигатели/ В. А. Григорьев, В. С. Кузьмичев, В. А. Зрелов [и др.] ; под редакцией В. А. Григорьева, А. И. Ланшина. — Самара : Самарский университет, 2021. — 436 с. — ISBN 978-5-7883-1587-4. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: https://e.lanbook.com/book/257072
3. Конструирование двигателей внутреннего сгорания : учебник / под редакцией Н. Д. Чайнова. — 3-е изд. — Москва : Машиностроение, 2023. — 496 с. — ISBN 978-5-907523-24-1. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: https://e.lanbook.com/book/307301

4.3. Дополнительная литература

1. Малоразмерные авиационные газотурбинные двигатели : учебное пособие / В. А. Григорьев, В. С. Кузьмичев, В. А. Зрелов [и др.] ; под редакцией В. А. Григорьева, А. И. Ланшина. — 2-е изд., доп. — Самара : Самарский университет, 2022. — 452 с. — ISBN 978-5-7883-1715-1. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: https://e.lanbook.com/book/336593
2. Батурин, О. В. Основные сведения о турбомашинах и их применении в современной технике : учебное пособие / О. В. Батурин, В. Н. Матвеев, Г. М. Попов. — Самара : Самарский университет, 2020. — 108 с. — ISBN 978-5-7883-1578-2. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: https://e.lanbook.com/book/188956
3. Надежность авиационной техники : методические указания / составитель И. В. Любимов. — Санкт-Петербург : СПБГУ ГА им. А.А. Новикова, 2022. — 21 с. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: https://e.lanbook.com/book/297245

4.4. Электронные образовательные ресурсы

Камеры сгорания перспективных микротурбин
https://online.mospolytech.ru/course/view.php?id=8230

4.5. Лицензионное и свободно распространяемое программное обеспечение

Для освоения дисциплины и выполнения учебных, научно-исследовательских и проектных работ в рамках образовательной программы рекомендуется использование следующего лицензионного и свободно распространяемого программного обеспечения.

Microsoft Windows – лицензионная операционная система, используемая для обеспечения работы всех учебных компьютеров и персональных устройств в аудиториях университета. Доступна на всех компьютерах университета в рамках лицензионного соглашения. Студенты могут использовать свободно распространяемые альтернативы (Linux, Astra Linux) для выполнения учебных задач.

Microsoft Office – лицензионный пакет офисных приложений, включающий текстовый редактор Word, табличный процессор Excel, программу для создания презентаций PowerPoint. Используется для оформления расчётно-пояснительных записок, отчётов, презентаций и другой учебной документации. Доступен на компьютерах университета. Свободными аналогами являются LibreOffice и OpenOffice.

КОМПАС-3D – российская система трёхмерного моделирования, широко используемая в отечественном машиностроении. Позволяет выполнять параметрическое моделирование, создавать чертежи в соответствии с ЕСКД, проводить прочностные расчёты в среде APM FEM. Учебная версия доступна для свободного скачивания на сайте разработчика (https://kompas.ru).

4.6. Современные профессиональные базы данных и информационные справочные системы

Для успешного освоения образовательной программы и выполнения научно-исследовательских, проектных и выпускных квалификационных работ студентам рекомендуется использовать следующие современные профессиональные базы данных и информационные справочные системы.

Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU – крупнейшая российская электронная библиотека научных публикаций, интегрированная с Российским индексом научного цитирования (РИНЦ). Содержит полнотекстовые статьи из научных журналов по энергетическому машиностроению, двигателестроению и смежным отраслям. Позволяет отслеживать публикационную активность и находить актуальные исследования. Доступ открыт с любого компьютера через сеть Интернет по адресу: https://elibrary.ru.

КиберЛенинка – научная электронная библиотека открытого доступа. Содержит полнотекстовые научные статьи, в том числе по техническим наукам, энергетическому машиностроению и двигателестроению. Все материалы доступны бесплатно. Адрес ресурса: https://cyberleninka.ru.

Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов (docs.cntd.ru**)** – бесплатная база нормативных документов, включающая ГОСТы, технические условия, строительные нормы и правила. Удобна для оперативного поиска актуальных стандартов, необходимых при проектировании и расчётах деталей и узлов двигателей. Адрес: https://docs.cntd.ru.

Росстандарт (ФГУП «Стандартинформ») – официальный сайт Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии. Содержит информацию о действующих стандартах, технических регламентах и нормативных документах. Адрес: https://www.gost.ru.

Научная библиотека Московского политехнического университета – электронный каталог библиотеки университета, содержащий информацию о фондах учебной и научной литературы. Доступен с любого устройства, имеющего подключение к интернету. Адрес: https://lib.mospolytech.ru.

«Известия вузов. Машиностроение» – рецензируемый научный журнал открытого доступа, публикующий статьи по актуальным проблемам машиностроения, включая двигателестроение. Входит в перечень ВАК. Содержит исследования по рабочему процессу ДВС, динамике, прочности и другим направлениям. Адрес: https://izvuzmash.ru.

Объединение сетевых электронных библиотек (СЭБ) – некоммерческое партнёрство, объединяющее научную и учебную литературу вузов — участников проекта. Обеспечивает доступ к учебно-методическим материалам по техническим специальностям. Доступ осуществляется через портал ЭБС «Лань»: https://e.lanbook.com (авторизация по IP-адресам университета или через личный кабинет).

5. Материально-техническое обеспечение

Для успешного освоения дисциплины используется общий аудиторный фонд университета и специализированные аудитории, закреплённые за кафедрой, имеющие следующее материально-техническое обеспечение:

Наименование специальных помещений	**Оснащённость специальных помещений**
Аудитория для лекционных, семинарских и практических занятий № Нд-222 107023, г. Москва, ул. Б. Семёновская, д. 38, стр.13	Комплект мебели для учебного процесса. Мультимедийное оборудование: интерактивная электронная доска, экран для проектора, переносной ноутбук, проектор. Возможность доступа в интернет.
Аудитория для лекционных, семинарских и практических занятий № Нд-223 107023, г. Москва, ул. Б. Семёновская, д. 38, стр.13	Комплект мебели для учебного процесса. Мультимедийное оборудование: интерактивная электронная доска, переносной ноутбук. Возможность доступа в интернет.
Компьютерный класс № Нд-224 107023, г. Москва, ул. Б. Семёновская, д. 38, стр.13	Компьютеры и мебель для учебного процесса. Мультимедийное оборудование: интерактивная электронная доска, переносной ноутбук. Возможность доступа в интернет.

Наименование специальных помещений	Оснащённость специальных помещений
Аудитория для лекционных, семинарских и практических занятий № Нд-229 107023, г. Москва, ул. Б. Семёновская, д. 38, стр.13	Комплект мебели для учебного процесса. Мультимедийное оборудование: интерактивная электронная доска, переносной ноутбук. Возможность доступа в интернет.
Аудитория для лекционных, семинарских и практических занятий № Н-406 107023, г. Москва, ул. Б. Семёновская, д. 38, стр.13	Комплект мебели для учебного процесса. Мультимедийное оборудование: интерактивная электронная доска, экран для проектора, переносной ноутбук, проектор. Возможность доступа в интернет.

6. Методические рекомендации

6.1. Методические рекомендации для преподавателя по организации обучения

Эффективность освоения дисциплины определяется качеством организации учебного процесса, выбором адекватных форм и методов обучения. Преподавателю необходимо учитывать специфику дисциплины, уровень подготовленности обучающихся и современные образовательные технологии.

Возможно проведение занятий и аттестаций в дистанционном формате с применением системы дистанционного обучения университета (СДО-LMS). Порядок проведения работ в дистанционном формате устанавливается отдельными распоряжениями проректора по учебной работе и/или центром учебно-методической работы.

Перед началом преподавания преподавателю необходимо:

- изучить рабочую программу, цели и задачи дисциплины;
- чётко представлять, какие знания, умения и навыки должен приобрести студент;
- ознакомиться с видами учебной работы и содержанием разделов дисциплины.

В ходе лекционного занятия преподаватель должен:

- назвать тему, учебные вопросы, ознакомить студентов с перечнем основной и дополнительной литературы;
- во вступительной части обосновать место и роль темы, раскрыть её практическое значение, увязать с предыдущим материалом;
- в основной части раскрывать содержание учебных вопросов, акцентировать внимание на ключевых категориях, явлениях и процессах, аргументированно обосновывать собственную позицию, приводить примеры, задавать риторические вопросы;
- руководить конспектированием, подчёркивая необходимость фиксации основных положений;
- в заключительной части сформулировать выводы, объявить план следующего занятия, дать рекомендации по подготовке.

При проведении практических (семинарских) занятий рекомендуется:

- обеспечивать активное участие всех студентов, использовать индивидуальные выступления, групповые дискуссии, решение практических задач, разбор кейсов;
- контролировать степень усвоения материала, поощрять самостоятельный поиск информации.

При проведении лабораторных занятий (при наличии) рекомендуется:

- ознакомить студентов с правилами техники безопасности;
- обеспечить понимание цели и задач каждой работы;
- организовать защиту работ с оценкой понимания сущности изучаемых процессов.

При организации самостоятельной работы студентов следует:

- чётко формулировать задания, указывать сроки выполнения;
- обеспечивать необходимыми учебно-методическими материалами;
- осуществлять регулярный контроль выполнения.

При проведении текущего контроля и промежуточной аттестации рекомендуется:

- использовать разнообразные формы контроля в соответствии с фондом оценочных средств;

- обеспечить объективность оценивания, руководствуясь установленными критериями;

- своевременно доводить результаты до студентов с указанием ошибок и рекомендаций.

В целях повышения эффективности образовательного процесса рекомендуется использовать:

- мультимедийные презентации для визуализации материала;

- интерактивные методы обучения (деловые игры, дискуссии, разбор кейсов);

- дистанционные образовательные технологии;

- материалы, размещённые в системе дистанционного обучения Московского Политеха (СДО-LMS).

6.2. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины

Освоение дисциплины осуществляется при контактной работе с преподавателем и в процессе самостоятельной работы. Эффективное освоение предполагает регулярное посещение всех видов аудиторных занятий, выполнение плана самостоятельной работы в полном объёме и прохождение аттестации в соответствии с календарным учебным графиком.

Студенту рекомендуется ознакомиться со списком основной и дополнительной литературы и взять в библиотеке необходимые издания. Доступ к информационным ресурсам организован в читальных залах библиотеки со стационарных ПЭВМ, либо с личного устройства через беспроводной доступ.

Изучение дисциплины должно сопровождаться интенсивной самостоятельной работой с рекомендованными источниками и материалами лекций. Начинать самостоятельные занятия следует с первого дня изучения дисциплины и проводить их регулярно.

Каждый студент должен самостоятельно планировать свою работу, исходя из возможностей и приоритетов. Для плодотворной работы важно организовать постоянное рабочее место, чередовать труд и отдых (перерывы каждые 1–2 часа).

7. Фонд оценочных средств

7.1 Методы контроля и оценивания результатов обучения

Сформированность компетенций при изучении дисциплины определяется посредством оценки соответствия ответов и/или выполнения заданий заявленным индикаторам в рамках мероприятий текущего контроля и промежуточной аттестации (зачета). Дисциплина «Камеры сгорания газотурбинных двигателей» является формирующей для компетенции **ПК-2**, обеспечивая теоретические знания и практические навыки в области теории, расчёта, конструирования и доводки камер сгорания газотурбинных двигателей, включая изучение процессов горения, аэродинамики, теплообмена и методов обеспечения устойчивой и эффективной работы камер сгорания в широком диапазоне режимов, необходимых для выполнения третьего этапа сквозного проектирования «Расчётное обоснование, верификация и оптимизация» и подготовки к проектированию полного цикла газотурбинной установки.

В процессе изучения дисциплины оценивается сформированность следующих компетенций и индикаторов:

ПК-2. Способен проводить расчетно-теоретические исследования узлов и систем поршневых двигателей и турбомашин с применением методов математического и компьютерного моделирования (CAE)

Индикаторы достижения компетенции:

- **ИПК-2.4.** Способен строить расчётную сетку для моделирования течения **в камере сгорания газотурбинного двигателя**.
- **ИПК-2.5.** Способен получать распределение давления и скорости потока **в камере сгорания**, оценивать гидравлические потери.
- **ИПК-2.8.** Способен проводить расчёт и анализ теплового состояния **жаровой трубы и элементов камеры сгорания** с применением методов сопряжённого теплообмена.

Дисциплина «Камеры сгорания газотурбинных двигателей» является специализированным курсом третьего этапа сквозного проекта «Расчётное обоснование, верификация и оптимизация» в области газотурбинных двигателей. Она обеспечивает углублённое изучение процессов и методов расчёта камер сгорания, которые являются ключевым звеном любой газотурбинной установки. В ходе изучения дисциплины студент осваивает классификацию и требования к камерам сгорания, физико-химические основы процессов горения, аэродинамику и смесеобразование, конструкции камер сгорания различных типов, системы охлаждения жаровых труб, топливные форсунки, методы теплового и аэродинамического расчёта, экологические характеристики, а также перспективные разработки, включая водородные камеры сгорания.

В процессе изучения дисциплины используются следующие методы контроля.

Текущее (рубежное) тестирование по модулям

Проводится после завершения изучения каждого из двух модулей дисциплины. Тестирование осуществляется в письменной или компьютерной форме и включает вопросы закрытого и открытого типа, а также расчётные задачи, направленные на проверку знаний классификации камер сгорания, физико-химических основ горения, аэродинамики и смесеобразования, конструктивных особенностей различных типов камер сгорания, систем охлаждения, топливных форсунок, методов теплового и аэродинамического расчёта, а также экологических характеристик. Результаты тестирования используются для оценки уровня освоения материала модуля и определения готовности студента к дальнейшему обучению. Проверяемые индикаторы: ИПК-2.4, ИПК-2.5 (знания в области аэродинамического расчёта и моделирования течения в камере сгорания), ИПК-2.8 (знания в области теплового расчёта и анализа теплового состояния жаровой трубы).

Устный опрос (собеседование)

Проводится в ходе практических занятий для проверки понимания студентом теоретического материала, способности аргументированно излагать физико-химические основы процессов горения, методы расчёта камер сгорания, анализировать конструктивные особенности, обосновывать выбор типа камеры сгорания и системы охлаждения. Устный опрос может быть как индивидуальным, так и фронтальным, и направлен на выявление глубины усвоения материала, умения применять полученные знания для решения профессиональных задач. В рамках сквозного проекта устный опрос позволяет оценить способность студента выполнять тепловой и аэродинамический расчёт камеры сгорания для проектируемой газотурбинной установки. Проверяемые индикаторы: ИПК-2.4, ИПК-2.5, ИПК-2.8.

Практические занятия

В ходе выполнения практических заданий (расчёт стехиометрического соотношения и теплоты сгорания топлива, построение эпюры распределения воздуха по зонам камеры сгорания, изучение конструкций камер сгорания различных типов, анализ схем охлаждения жаровых труб, изучение конструкций и характеристик топливных форсунок, тепловой и аэродинамический расчёт камеры сгорания, расчёт массовых выбросов NOx, анализ перспективных конструкций водородных камер сгорания) оценивается способность студента применять теоретические знания для решения конкретных профессиональных задач. Результаты выполнения практических заданий фиксируются в виде отчётов, которые защищаются студентом в устной форме. Практические занятия ориентированы на формирование навыков расчёта и проектирования камер сгорания, необходимых для выполнения третьего этапа сквозного проекта. Проверяемые индикаторы: ИПК-2.4, ИПК-2.5, ИПК-2.8.

Индивидуальное задание в рамках сквозного проекта

Индивидуальное задание в рамках сквозного проекта является одним из ключевых методов контроля, позволяющим оценить способность студента применять полученные теоретические знания и практические навыки для решения комплексной профессиональной задачи. Задание выполняется студентом самостоятельно в течение семестра и представляет собой разработку раздела сквозного проекта, связанного с расчётом и проектированием камеры сгорания для малоразмерного газотурбинного двигателя. Содержание индивидуального задания включает анализ исходных данных (тип топлива, расход воздуха, давление и температура на входе, требуемая полнота сгорания), выбор типа камеры сгорания (кольцевая, трубчато-кольцевая), рас-

чёт геометрических параметров жаровой трубы, определение расхода воздуха по зонам, расчёт гидравлических потерь, оценку равномерности температурного поля на выходе, расчёт системы охлаждения жаровой трубы, а также расчёт массовых выбросов вредных веществ. Индивидуальное задание выполняется в форме пояснительной записки объёмом 10–15 страниц с графическими построениями (схема камеры сгорания, эпюра распределения воздуха, графики температур). Защита индивидуального задания проводится в форме презентации результатов перед преподавателем. Индивидуальное задание в рамках сквозного проекта позволяет комплексно оценить сформированность индикаторов ИПК-2.4, ИПК-2.5 и ИПК-2.8.

Зачет

Промежуточная аттестация проводится в форме зачета по завершении изучения дисциплины. Зачет позволяет комплексно оценить знания, умения и навыки студента по всем разделам дисциплины. Зачет проводится в форме устного собеседования по вопросам, охватывающим весь материал дисциплины. В процессе собеседования студент должен продемонстрировать знание классификации камер сгорания, физико-химических основ горения, конструктивных особенностей, методов теплового и аэродинамического расчёта, а также экологических характеристик. Результаты зачета определяют итоговую оценку по дисциплине и отражают степень сформированности знаний, необходимых для выполнения третьего этапа сквозного проекта «Расчётное обоснование, верификация и оптимизация». Проверяемые индикаторы: ИПК-2.4, ИПК-2.5, ИПК-2.8.

Роль дисциплины в оценке результатов сквозного проекта

Дисциплина «Камеры сгорания газотурбинных двигателей» формирует фундаментальные знания и практические навыки, необходимые для выполнения третьего этапа сквозного проекта — «Расчётное обоснование, верификация и оптимизация». В рамках этого этапа студент должен выполнить расчёт и проектирование камеры сгорания для проектируемой газотурбинной установки, определить её основные параметры, оценить эффективность и экологические показатели. Результаты освоения дисциплины оцениваются в ходе защиты индивидуального задания и отчёта по третьему этапу сквозного проекта. Оценка сформированности компетенций по дисциплине учитывается при подведении итогов выполнения сквозного проекта в целом, так как камера сгорания является одним из ключевых узлов газотурбинного двигателя, определяющим его эффективность, надёжность и экологические характеристики.

7.2 Шкала и критерии оценивания результатов обучения

7.2.1 Критерии оценки текущего (рубежного) тестирования по модулям

Текущее (рубежное) тестирование проводится после завершения изучения каждого модуля. Тест состоит из 20 заданий различного типа (выбор правильного ответа, установление соответствия, краткий ответ, расчётная задача). Каждое верно выполненное задание оценивается в 1 балл. Максимальное количество баллов за тест — 20.

Оценка «зачтено» выставляется студенту, если выполнено верно более 75% заданий теста (набрано более 15 баллов). Студент, получивший «зачтено», демонстрирует достаточное знание теоретического материала модуля, владеет основными понятиями теории горения, знает классификацию и конструктивные особенности камер сгорания, умеет рассчитывать основные параметры. Это свидетельствует о сформированности на пороговом уровне индикаторов ПК-2 в части теоретических основ расчёта камер сгорания.

Оценка «не зачтено» выставляется студенту, если выполнено верно менее 75% заданий теста (набрано 15 баллов и менее). Студент, получивший «не зачтено», не владеет основным материалом модуля, допускает грубые ошибки в классификации и устройстве камер сгорания, не может рассчитать основные параметры. Студент обязан ликвидировать задолженность по модулю до прохождения следующего рубежного контроля.

7.2.2 Критерии оценки устного опроса (собеседования)

Оценка «отлично» выставляется студенту, который глубоко и прочно усвоил материал, исчерпывающе и логически стройно его излагает. Студент демонстрирует полное знание классификации камер сгорания, физико-химических основ процессов горения, аэродинамики и смесеобразования, конструктивных особенностей различных типов камер сгорания, систем охла-

ждения жаровых труб, топливных форсунок, методов теплового и аэродинамического расчёта, экологических характеристик, а также перспективных разработок, включая водородные камеры сгорания. Уверенно и аргументированно отвечает на дополнительные вопросы, свободно владеет профессиональной терминологией. В контексте сквозного проекта такой уровень подготовки позволяет студенту самостоятельно выполнять тепловой и аэродинамический расчёт камеры сгорания для проектируемой газотурбинной установки.

Оценка «хорошо» выставляется студенту, который твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, не допуская существенных неточностей. Студент владеет основными понятиями и методами, умеет рассчитывать параметры камер сгорания, но может испытывать затруднения при ответе на уточняющие вопросы или при объяснении сложных разделов (например, расчёт охлаждения жаровых труб, анализ эмиссии NOx). В целом демонстрирует хорошее владение профессиональной терминологией.

Оценка «удовлетворительно» выставляется студенту, который имеет знания только основного материала, но не усвоил его деталей. Студент допускает неточности и ошибки в изложении, испытывает затруднения при расчёте параметров, обладает фрагментарными знаниями. Ответы на дополнительные вопросы даются с трудом, требуют наводящих вопросов. Профессиональная терминология используется недостаточно уверенно.

Оценка «неудовлетворительно» выставляется студенту, который не знает значительной части материала, допускает грубые ошибки в изложении, не может рассчитать параметры камеры сгорания. Отсутствует понимание принципов работы камер сгорания. Не способен ответить на дополнительные вопросы, не владеет профессиональной терминологией. Студент не готов к выполнению индивидуального задания в рамках сквозного проекта.

7.2.3 Критерии оценки практических занятий

Оценка «зачтено» выставляется студенту, который выполнил практическое задание правильно, в установленные сроки. Студент продемонстрировал понимание методики решения задачи, способность применять теоретические знания для расчёта параметров камеры сгорания, выбора конструктивных решений, анализа характеристик. При защите студент аргументирует полученные результаты, отвечает на уточняющие вопросы, демонстрирует владение профессиональной терминологией. В рамках сквозного проекта успешное выполнение практических заданий позволяет студенту овладеть методами расчёта камер сгорания.

Оценка «не зачтено» выставляется студенту, который не выполнил практическое задание, выполнил его не в полном объеме, или выполнил с грубыми ошибками. Студент не понимает методику решения, не может объяснить полученные результаты, не отвечает на вопросы по существу задания, не владеет профессиональной терминологией. Студент обязан выполнить практическое задание повторно в установленные преподавателем сроки.

7.2.4 Критерии оценки индивидуального задания в рамках сквозного проекта

Оценка «отлично» выставляется студенту, который полностью выполнил индивидуальное задание в соответствии с требованиями. Студент демонстрирует глубокое понимание методов расчёта и проектирования камер сгорания, самостоятельно выполняет тепловой и аэродинамический расчёт, выбирает тип камеры сгорания и систему охлаждения, рассчитывает геометрические параметры, оценивает экологические показатели. Пояснительная записка оформлена в соответствии с требованиями, графики и эскизы выполнены качественно. При защите студент свободно владеет материалом, аргументированно отвечает на вопросы, демонстрирует понимание взаимосвязи между конструктивными параметрами и характеристиками камеры сгорания. Сформированность индикаторов ПК-2 оценивается на продвинутом уровне.

Оценка «хорошо» выставляется студенту, который выполнил индивидуальное задание в полном объеме, но допускает отдельные неточности в расчётах или незначительные ошибки в построении эпюр. Студент демонстрирует понимание методов расчёта камер сгорания, но может испытывать затруднения при обосновании выбора типа камеры или системы охлаждения. Пояснительная записка оформлена в соответствии с требованиями, но содержит незначительные замечания. При защите студент в целом отвечает на вопросы, но может допускать неточности. Сформированность индикаторов оценивается на базовом уровне.

Оценка «удовлетворительно» выставляется студенту, который выполнил индивидуальное задание, но допустил существенные ошибки в расчётах или не полностью выполнил требуемые разделы. Студент демонстрирует фрагментарные знания методов расчёта камер сгорания, испытывает значительные затруднения при определении геометрических параметров. Пояснительная записка оформлена с нарушениями требований. При защите студент отвечает на вопросы неуверенно, требует наводящих вопросов. Сформированность индикаторов оценивается на пороговом уровне.

Оценка «неудовлетворительно» выставляется студенту, который не выполнил индивидуальное задание, выполнил его не в полном объеме или допустил грубые ошибки. Студент не демонстрирует понимания методов расчёта камер сгорания, не может рассчитать основные параметры. Пояснительная записка отсутствует или оформлена с грубыми нарушениями. При защите студент не отвечает на вопросы, не владеет профессиональной терминологией. Сформированность индикаторов не достигла порогового уровня. Студент обязан выполнить индивидуальное задание повторно в установленные преподавателем сроки.

7.2.5 Критерии оценки ответа на зачете

Оценка «зачтено» выставляется студенту, который в ходе собеседования демонстрирует достаточное знание программного материала по дисциплине. Студент ориентируется в классификации камер сгорания, знает физико-химические основы горения, понимает принципы аэродинамики и смесеобразования, знает конструктивные особенности различных типов камер сгорания, умеет рассчитывать основные параметры. Ответы на вопросы в целом правильные, но могут содержать незначительные неточности, не искажающие сути. Студент владеет профессиональной терминологией, способен применять полученные знания для решения практических задач (расчёт геометрических параметров, выбор системы охлаждения). Сформированность индикаторов ПК-2 оценивается на пороговом или базовом уровне, что позволяет студенту приступить к выполнению последующих этапов сквозного проекта.

Оценка «не зачтено» выставляется студенту, который в ходе собеседования не может ответить на основные вопросы по дисциплине, допускает грубые ошибки в классификации камер сгорания, не знает физико-химических основ горения, не может рассчитать основные параметры. Студент не владеет профессиональной терминологией, не способен применять полученные знания для решения практических задач. Сформированность индикаторов ПК-2 не достигла порогового уровня, что делает невозможным выполнение третьего этапа сквозного проекта.

7.2.6 Соответствие методов контроля проверяемым индикаторам компетенций

В процессе изучения дисциплины оценивается сформированность знаний и навыков, необходимых для освоения индикаторов компетенции ПК-2. Дисциплина является формирующей для указанной компетенции.

ИПК-2.4. Способен строить расчётную сетку для моделирования течения в камере сгорания газотурбинного двигателя. Формируется через изучение аэродинамики камер сгорания, построение расчётных сеток для моделирования течения в камере сгорания. Проверяется методами: текущее тестирование, устный опрос, практические занятия, индивидуальное задание, зачет.

ИПК-2.5. Способен получать распределение давления и скорости потока в камере сгорания, оценивать гидравлические потери. Формируется через изучение аэродинамического расчёта камер сгорания, определение распределения воздуха по зонам, расчёт гидравлических потерь. Проверяется методами: текущее тестирование, устный опрос, практические занятия, индивидуальное задание, зачет.

ИПК-2.8. Способен проводить расчёт и анализ теплового состояния жаровой трубы и элементов камеры сгорания с применением методов сопряжённого теплообмена. Формируется через изучение теплового расчёта камер сгорания, систем охлаждения жаровых труб, анализа температурных полей, определения тепловых потоков. Проверяется методами: текущее тестирование, устный опрос, практические занятия, индивидуальное задание, зачет.

Оценка сформированности знаний и навыков осуществляется комплексно с использованием всех методов контроля. Результаты текущего и итогового тестирования, устных опросов,

выполнения практических заданий, защиты индивидуального задания в рамках сквозного проекта, а также зачета учитываются при формировании итоговой оценки по дисциплине и оценке выполнения третьего этапа сквозного проекта. Дисциплина «Камеры сгорания газотурбинных двигателей» закладывает содержательную основу для последующего формирования компетенций на этапах конструирования и доводки газотурбинных установок, обеспечивая студента знаниями и навыками, необходимыми для расчёта и проектирования камер сгорания, оценки их эффективности и экологических показателей.

7.3 Оценочные средства

7.3.1 Текущий контроль

7.3.1.1 Модульная структура дисциплины

Дисциплина изучается в 7-м семестре. Семестр делится на два равных модуля (периода), каждый из которых включает определенные темы.

Модуль 1 (недели 1–8) — Физико-химические основы. Конструкции камер сгорания и системы охлаждения

Включает темы: Тема 1. Введение. Классификация и требования к камерам сгорания ГТД; Тема 2. Физико-химические основы процессов горения; Тема 3. Аэродинамика и смесеобразование в камерах сгорания; Тема 4. Конструкции камер сгорания (трубчатые, трубчато-кольцевые, кольцевые); Тема 5. Системы охлаждения жаровых труб.

Модуль 2 (недели 9–16) — Топливные форсунки. Расчётные методы. Экология и перспективы

Включает темы: Тема 6. Топливные форсунки и системы подачи топлива; Тема 7. Тепловой и аэродинамический расчет камер сгорания; Тема 8. Экологические характеристики камер сгорания; Тема 9. Перспективные разработки и водородные камеры сгорания.

7.3.1.2 Рубежный контроль по модулям (устный опрос/собеседование)

7.3.1.2.1 Модуль 1. Физико-химические основы. Конструкции камер сгорания и системы охлаждения

Перечень вопросов для собеседования:

1. Назначение камеры сгорания. Роль камеры сгорания в рабочем процессе ГТД. Место дисциплины в сквозном проекте.
2. Основные требования к камерам сгорания: полнота сгорания, устойчивость горения, равномерность температурного поля на выходе, гидравлическое сопротивление, ресурс, габариты, экологические показатели.
3. Классификация камер сгорания: трубчатые (камерные), трубчато-кольцевые, кольцевые. Сравнительный анализ, преимущества и недостатки.
4. Химические реакции горения углеводородных топлив. Стехиометрическое соотношение. Коэффициент избытка воздуха.
5. Скорость химической реакции. Механизмы горения: кинетическая и диффузионная области. Температура горения и её влияние на образование NOx.
6. Пределы воспламенения. Время задержки воспламенения. Устойчивость пламени. Критерии устойчивости.
7. Структура течения в камере сгорания: первичная зона (зона горения), вторичная зона (зона смешения), третичная зона (зона охлаждения).
8. Организация пристеночных течений. Распределение воздуха по зонам: первичный воздух, вторичный воздух, третичный воздух.
9. Смесеобразование: распыливание топлива, испарение, перемешивание с воздухом. Влияние формы и размера жаровой трубы на смесеобразование.
10. Гидравлическое сопротивление камеры сгорания и его влияние на КПД ГТД.
11. Конструкция трубчатых (камерных) камер сгорания: устройство, преимущества (простота, удобство отработки), недостатки (большая масса, неравномерность поля температур).
12. Конструкция трубчато-кольцевых камер сгорания: компоновка, жаровые трубы, перепускные трубки.

13. Конструкция кольцевых камер сгорания: устройство, преимущества (малая длина, равномерное поле температур), недостатки (сложность отработки).

14. Конструкция корпусов камер сгорания. Материалы камер сгорания (жаропрочные сплавы, керамика). Особенности конструкции камер сгорания для малоразмерных ГТД и турбокомпрессоров.

15. Необходимость охлаждения жаровых труб. Методы охлаждения: конвективное (гладкие стенки, ребристые стенки), плёночное (завесное), пористое (транспирационное), комбинированное.

16. Конструктивные способы организации охлаждения: перфорация, гофрированные вставки, лабиринтные каналы. Влияние охлаждения на ресурс и эффективность камеры сгорания.

17. Тепловое состояние жаровой трубы: определение тепловых потоков, температурные поля.

7.3.1.2.2 Модуль 2. Топливные форсунки. Расчётные методы. Экология и перспективы

Перечень вопросов для собеседования:

1. Классификация топливных форсунок: центробежные (одноканальные, двухканальные), двухконтурные, эжекционные, пневматические. Конструкция и принцип работы.

2. Характеристики форсунок: угол распыла, дисперсность капель, производительность. Форсунки для газообразного топлива (природный газ, водород).

3. Топливные насосы: шестеренные, центробежные. Регулирование подачи топлива. Требования к чистоте топлива.

4. Цели и задачи теплового и аэродинамического расчёта камер сгорания. Определение расхода воздуха на горение.

5. Коэффициент избытка воздуха в первичной зоне. Расчет геометрических параметров жаровой трубы (диаметр, длина, количество отверстий).

6. Определение полноты сгорания. Расчет гидравлических потерь в камере сгорания. Расчет равномерности температурного поля на выходе.

7. Использование CFD-моделирования для уточнения параметров камеры сгорания.

8. Образование вредных веществ в камерах сгорания: оксиды азота (NOx), оксид углерода (CO), несгоревшие углеводороды (CH).

9. Механизмы образования NOx: термический (цепной) механизм Зельдовича, быстрый механизм Фенимора. Влияние коэффициента избытка воздуха, температуры, времени пребывания на эмиссию NOx.

10. Методы снижения выбросов: стехиометрическое горение, бедное горение (Lean Burn), двухзонное горение, впрыск воды/пара.

11. Нормирование выбросов для авиационных и наземных ГТД (ICAO, ЕЭК ООН). Сертификационные испытания камер сгорания.

12. Тенденции развития камер сгорания: повышение температуры газа перед турбиной, снижение выбросов NOx. Конструкции с бедным предварительным смешением (LPP — Lean Premixed Prevaporized).

13. Микросмесительные (micromix) камеры сгорания. Особенности сжигания водорода в ГТД: высокая скорость горения, широкие пределы воспламенения, проблема образования NOx.

14. Конструкции водородных камер сгорания (диффузионное горение, микросмешение). Применение синтетических топлив (e-fuels).

15. Применение результатов расчёта камер сгорания для последующего конструирования (выбор материалов, определение ресурса, обеспечение надёжности).

7.3.1.3 Рубежный контроль по модулям (тестирование)

Тестирование проводится после завершения изучения каждого модуля. Тест состоит из 20 заданий различного типа (выбор правильного ответа, установление соответствия, краткий ответ, расчётная задача). Каждое верно выполненное задание оценивается в 1 балл. Максималь-

ное количество баллов за тест — 20. Оценка «зачтено» выставляется при выполнении верно более 75% заданий (более 15 баллов).

Пример тестовых заданий (один вариант)

1. **Какой тип камеры сгорания характеризуется наименьшей длиной и наиболее равномерным температурным полем на выходе?**
2. A) Трубчатая (камерная)
3. B) Трубчато-кольцевая
4. C) Кольцевая
5. D) Все типы имеют одинаковые характеристики

Правильный ответ: C

2. **Какой параметр характеризует отношение действительного количества воздуха к теоретически необходимому для полного сгорания топлива?**
3. A) Коэффициент избытка воздуха
4. B) Степень реактивности
5. C) Коэффициент напора
6. D) Степень понижения давления

Правильный ответ: A

3. **Какой метод охлаждения жаровых труб основан на создании защитной воздушной плёнки на внутренней поверхности?**
4. A) Конвективное охлаждение
5. B) Плёночное (завесное) охлаждение
6. C) Пористое (транспирационное) охлаждение
7. D) Излучение

Правильный ответ: B

4. **Какой механизм образования оксидов азота (NOx) преобладает при высоких температурах (выше 1800°C)?**
5. A) Быстрый механизм Фенимора
6. B) Термический (цепной) механизм Зельдовича
7. C) Механизм образования из топливного азота
8. D) Механизм диссоциации

Правильный ответ: B

5. **Какая конструкция камеры сгорания применяется в современных авиационных двигателях для обеспечения минимальной длины и равномерного поля температур?**
6. A) Трубчатая
7. B) Трубчато-кольцевая
8. C) Кольцевая
9. D) Камерная

Правильный ответ: C

7.3.1.4 Оценочные средства для индивидуального задания в рамках сквозного проекта

Индивидуальное задание в рамках сквозного проекта является одним из ключевых методов контроля, позволяющим оценить способность студента применять полученные теоретические знания и практические навыки для решения комплексной профессиональной задачи. Задание выполняется студентом самостоятельно в течение семестра и представляет собой разработку раздела сквозного проекта, связанного с расчётом и проектированием камеры сгорания для малоразмерного газотурбинного двигателя.

Содержание индивидуального задания:

Индивидуальное задание включает в себя выполнение следующих этапов:

1. **Анализ исходных данных.** Студент получает исходные данные для расчёта: тип топлива (керосин, природный газ, водород), расход воздуха, давление и температура на входе в камеру сгорания, требуемая полнота сгорания, допустимое гидравлическое сопротивление, допустимая неравномерность температурного поля на выходе.

2. **Выбор типа камеры сгорания.** На основе анализа исходных данных и назначения газотурбинной установки студент обосновывает выбор типа камеры сгорания (кольцевая, трубчато-кольцевая). Выбор обосновывается с учётом требований к массогабаритным показателям, равномерности температурного поля, удобству отработки.

3. **Расчёт распределения воздуха по зонам.** Определяется расход воздуха, направляемый в первичную зону (для горения), вторичную зону (для смешения) и третичную зону (для охлаждения). Рассчитывается коэффициент избытка воздуха в первичной зоне.

4. **Расчёт геометрических параметров жаровой трубы.** Определяются диаметр жаровой трубы, её длина, количество и диаметр отверстий для подвода воздуха в различные зоны. Рассчитывается площадь проходных сечений.

5. **Расчёт гидравлических потерь.** Определяются потери полного давления в камере сгорания. Оценивается соответствие расчётных потерь допустимым значениям.

6. **Расчёт полноты сгорания и равномерности температурного поля.** Оценивается полнота сгорания топлива. Определяется равномерность температурного поля на выходе из камеры сгорания.

7. **Расчёт системы охлаждения.** Выбирается тип охлаждения жаровой трубы (конвективное, плёночное, комбинированное). Рассчитываются параметры охлаждения (расход охлаждающего воздуха, температура стенки).

8. **Расчёт экологических характеристик.** Оцениваются массовые выбросы оксидов азота (NOx), оксида углерода (CO) и несгоревших углеводородов (CH). Проводится анализ соответствия выбросов нормативным требованиям.

9. **Подготовка отчёта.** Выполняется пояснительная записка, в которой описываются все этапы расчёта, приводятся расчётные формулы, таблицы результатов, графические построения (схема камеры сгорания, эпюра распределения воздуха, температурные поля). Делаются выводы о соответствии спроектированной камеры сгорания требованиям технического задания.

Требования к оформлению:

Индивидуальное задание выполняется в форме пояснительной записки объёмом 10–15 страниц, включающей:

- титульный лист с указанием темы задания, ФИО студента, группы, руководителя;
- содержание;
- введение с обоснованием актуальности проектирования камеры сгорания;
- основную часть, содержащую исходные данные, выбор типа камеры, расчёт распределения воздуха, расчёт геометрических параметров, расчёт гидравлических потерь, расчёт полноты сгорания, расчёт системы охлаждения, расчёт экологических характеристик;
- графическую часть (схема камеры сгорания с указанием основных размеров, эпюра распределения воздуха, температурные поля);
- заключение с выводами по результатам выполненной работы;
- список использованных источников.

Примерные темы индивидуальных заданий:

1. Расчёт и проектирование кольцевой камеры сгорания для малоразмерного ГТД мощностью 50 кВт.
2. Расчёт и проектирование трубчато-кольцевой камеры сгорания для вспомогательной силовой установки (ВСУ).
3. Расчёт камеры сгорания газотурбинного двигателя для газоперекачивающего агрегата.
4. Расчёт системы охлаждения жаровой трубы кольцевой камеры сгорания.
5. Расчёт выбросов NOx для камеры сгорания авиационного ГТД на режиме взлёта.
6. Сравнительный анализ эмиссионных характеристик камер сгорания при работе на керосине и водороде.
7. Расчёт камеры сгорания с бедным предварительным смешением (LPP) для снижения выбросов NOx.

8. Проектирование микросмесительной (micromix) камеры сгорания для водородного ГТД.

7.3.1.5 Оценочные средства для практических занятий

Типовые задания для практических занятий

Модуль 1. Физико-химические основы. Конструкции камер сгорания и системы охлаждения

Задание 1. Расчёт стехиометрического соотношения и теплоты сгорания топлива

Для заданного состава топлива (керосин, метан, водород) определить стехиометрическое количество воздуха, необходимое для полного сгорания 1 кг топлива. Рассчитать низшую теплоту сгорания топлива.

Задание 2. Построение эпюры распределения воздуха по зонам камеры сгорания

По заданному распределению расходов воздуха по зонам (первичная, вторичная, третичная) построить эпюру распределения воздуха. Определить коэффициент избытка воздуха в первичной зоне. Проанализировать влияние распределения воздуха на полноту сгорания и равномерность температурного поля.

Задание 3. Изучение конструкций камер сгорания различных типов (по разрезам, 3D-моделям)

По предоставленным разрезам или 3D-моделям камер сгорания определить тип камеры (трубчатая, трубчато-кольцевая, кольцевая). Идентифицировать основные элементы: корпус, жаровые трубы, топливные форсунки. Проанализировать конструктивные особенности, влияющие на равномерность температурного поля.

Задание 4. Анализ схем охлаждения жаровых труб. Расчёт конвективного охлаждения

По заданным параметрам (тепловой поток, температура газа, температура стенки, коэффициент теплоотдачи) рассчитать необходимую толщину стенки жаровой трубы для обеспечения конвективного охлаждения. Сравнить эффективность различных схем охлаждения.

Модуль 2. Топливные форсунки. Расчётные методы. Экология и перспективы

Задание 5. Изучение конструкций и характеристик топливных форсунок

По предоставленным разрезам или 3D-моделям топливных форсунок определить тип форсунки (центробежная, двухконтурная, эжекционная). Проанализировать влияние угла распыла и дисперсности капель на качество смесеобразования.

Задание 6. Тепловой и аэродинамический расчёт камеры сгорания (по заданным параметрам)

По заданным параметрам (расход воздуха, давление и температура на входе, расход топлива) выполнить тепловой расчёт камеры сгорания: определить температуру газов на выходе, полноту сгорания, гидравлические потери. Рассчитать основные геометрические параметры жаровой трубы.

Задание 7. Расчёт массовых выбросов NOx по эмпирическим зависимостям

По заданным параметрам камеры сгорания (температура в первичной зоне, время пребывания, давление) рассчитать массовые выбросы NOx. Проанализировать влияние температуры и коэффициента избытка воздуха на эмиссию NOx.

Задание 8. Анализ перспективных конструкций водородных камер сгорания

По предоставленным схемам и описаниям конструкций водородных камер сгорания (диффузионное горение, микро-смешение) проанализировать их конструктивные особенности. Оценить преимущества и недостатки каждого типа. Объяснить, как решается проблема образования NOx при сжигании водорода.

Задание 9. Комплексный расчёт и анализ камеры сгорания для проектируемого ГТД

По заданным параметрам проектируемого ГТД выполнить комплексный расчёт камеры сгорания: определить расход воздуха, выбрать тип камеры, рассчитать геометрические параметры, оценить гидравлические потери, полноту сгорания, экологические характеристики. Сформулировать выводы и рекомендации.

7.3.1.6 Оценочные средства для курсовой работы (проекта)

Курсовой проект (курсовая работа) по дисциплине не предусмотрены учебным планом. Результаты освоения дисциплины (расчёт и проектирование камеры сгорания) используются при выполнении выпускной квалификационной работы для проектирования камеры сгорания малоразмерного ГТД или для обоснования выбора системы смесеобразования и охлаждения в составе сквозного проекта.

7.3.2 Промежуточная аттестация (зачет)

7.3.2.1 Условия допуска к зачету

Студент допускается к сдаче зачета при выполнении следующих условий:

- Успешное прохождение всех двух рубежных контролей (устных опросов по модулям) с оценкой не ниже «удовлетворительно».
- Выполнение и защита всех практических занятий, предусмотренных учебным планом (не менее 80% заданий выполнены и защищены).
- Выполнение и защита индивидуального задания в рамках сквозного проекта (расчёт и проектирование камеры сгорания) с оценкой не ниже «удовлетворительно».
- Отсутствие академической задолженности по дисциплине.

7.3.2.2 Структура билета на зачете

Зачет проводится в форме устного собеседования по вопросам, охватывающим весь материал дисциплины. В процессе собеседования студенту может быть предложено выполнить практическое задание (расчёт параметров камеры сгорания, анализ конструктивной схемы, обоснование выбора системы охлаждения).

Структура собеседования:

- **Теоретический вопрос 1:** из области классификации камер сгорания, физико-химических основ горения, аэродинамики и смесеобразования, конструкций камер сгорания, систем охлаждения.
- **Теоретический вопрос 2:** из области топливных форсунок, методов теплового и аэродинамического расчёта, экологических характеристик, перспективных разработок.
- **Практическое задание:** расчёт параметров камеры сгорания, анализ конструктивной схемы, обоснование выбора системы охлаждения.

7.3.2.3 Перечень вопросов для подготовки к зачету

Модуль 1. Физико-химические основы. Конструкции камер сгорания и системы охлаждения

1. Назначение камеры сгорания. Роль камеры сгорания в рабочем процессе ГТД. Место дисциплины в сквозном проекте.
2. Основные требования к камерам сгорания: полнота сгорания, устойчивость горения, равномерность температурного поля на выходе, гидравлическое сопротивление, ресурс, габариты, экологические показатели.
3. Классификация камер сгорания: трубчатые (камерные), трубчато-кольцевые, кольцевые. Сравнительный анализ.
4. Химические реакции горения углеводородных топлив. Стехиометрическое соотношение. Коэффициент избытка воздуха.
5. Скорость химической реакции. Механизмы горения: кинетическая и диффузионная области. Температура горения.
6. Пределы воспламенения. Время задержки воспламенения. Устойчивость пламени.
7. Структура течения в камере сгорания: первичная зона, вторичная зона, третичная зона. Организация пристеночных течений.
8. Распределение воздуха по зонам: первичный воздух, вторичный воздух, третичный воздух. Влияние распределения на рабочий процесс.
9. Смесеобразование: распыливание топлива, испарение, перемешивание с воздухом. Влияние формы и размера жаровой трубы на смесеобразование.
10. Гидравлическое сопротивление камеры сгорания и его влияние на КПД ГТД.
11. Конструкция трубчатых (камерных) камер сгорания: устройство, преимущества, недостатки.

12. Конструкция трубчато-кольцевых камер сгорания: компоновка, жаровые трубы, перепускные трубки.

13. Конструкция кольцевых камер сгорания: устройство, преимущества, недостатки.

14. Конструкция корпусов камер сгорания. Материалы камер сгорания. Особенности конструкции камер сгорания для малоразмерных ГТД и турбокомпрессоров.

15. Необходимость охлаждения жаровых труб. Методы охлаждения: конвективное, плёночное, пористое, комбинированное.

16. Конструктивные способы организации охлаждения: перфорация, гофрированные вставки, лабиринтные каналы.

17. Тепловое состояние жаровой трубы: определение тепловых потоков, температурные поля.

Модуль 2. Топливные форсунки. Расчётные методы. Экология и перспективы

18. Классификация топливных форсунок: центробежные (одноканальные, двухканальные), двухконтурные, эжекционные, пневматические. Конструкция и принцип работы.

19. Характеристики форсунок: угол распыла, дисперсность капель, производительность. Форсунки для газообразного топлива.

20. Топливные насосы: шестеренные, центробежные. Регулирование подачи топлива.

21. Цели и задачи теплового и аэродинамического расчёта камер сгорания. Определение расхода воздуха на горение.

22. Коэффициент избытка воздуха в первичной зоне. Расчет геометрических параметров жаровой трубы.

23. Определение полноты сгорания. Расчет гидравлических потерь в камере сгорания. Расчет равномерности температурного поля на выходе.

24. Использование CFD-моделирования для уточнения параметров камеры сгорания.

25. Образование вредных веществ в камерах сгорания: оксиды азота (NOx), оксид углерода (CO), несгоревшие углеводороды (CH).

26. Механизмы образования NOx: термический (цепной) механизм Зельдовича, быстрый механизм Фенимора. Влияние параметров на эмиссию NOx.

27. Методы снижения выбросов: стехиометрическое горение, бедное горение (Lean Burn), двухзонное горение, впрыск воды/пара.

28. Нормирование выбросов для авиационных и наземных ГТД (ICAO, ЕЭК ООН). Сертификационные испытания камер сгорания.

29. Тенденции развития камер сгорания: повышение температуры газа перед турбиной, снижение выбросов NOx. Конструкции с бедным предварительным смешением (LPP).

30. Микросмесительные (micromix) камеры сгорания. Особенности сжигания водорода в ГТД.

31. Конструкции водородных камер сгорания (диффузионное горение, микросмешение). Применение синтетических топлив (e-fuels).

32. Применение результатов расчёта камер сгорания для последующего конструирования (выбор материалов, определение ресурса, обеспечение надёжности).

7.3.2.4 Примеры практических заданий для зачета

Пример 1. Расчёт стехиометрического соотношения и теплоты сгорания топлива

Для керосина, имеющего условный состав: C = 86%, H = 14%, определить:

- стехиометрическое количество воздуха L0 (кг воздуха/кг топлива);
- низшую теплоту сгорания топлива Qн (МДж/кг).

Принять: атомная масса C = 12, H = 1, O = 16, N = 14; массовая доля кислорода в воздухе 0,23.

Пример 2. Расчёт параметров камеры сгорания

Для кольцевой камеры сгорания заданы:

- расход воздуха Gв = 2,5 кг/с;
- расход топлива Gт = 0,1 кг/с;
- коэффициент избытка воздуха в первичной зоне $\alpha 1 = 0,8$;
- полнота сгорания $\eta г = 0,99$;

- температура воздуха на входе Твх = 700 К;
- температура газов на выходе Твых = 1500 К.

Требуется:

1. Определить общий коэффициент избытка воздуха α.
2. Определить расход воздуха, направляемый в первичную зону G1.
3. Определить расход воздуха, направляемый во вторичную и третичную зоны.
4. Оценить гидравлическое сопротивление камеры сгорания, приняв $\xi = 0{,}05$, $\rho = 4$ кг/м³, $w = 50$ м/с.

Пример 3. Анализ конструктивной схемы камеры сгорания

По представленному рисунку или 3D-модели камеры сгорания определить:

- тип камеры (трубчатая, трубчато-кольцевая, кольцевая);
- идентифицировать основные элементы: корпус, жаровые трубы, топливные форсунки;
- определить тип топливных форсунок;
- определить тип охлаждения жаровых труб;
- обосновать свой ответ, указав характерные конструктивные признаки.

Пример 4. Расчёт системы охлаждения жаровой трубы

Для жаровой трубы заданы:

- тепловой поток q = 100 кВт/м²;
- температура газа Тг = 1800 К;
- требуемая температура стенки Тст = 900 К;
- коэффициент теплоотдачи от газа к стенке αг = 500 Вт/(м²·К);
- коэффициент теплоотдачи от стенки к охлаждающему воздуху αв = 800 Вт/(м²·К).

Требуется:

1. Определить необходимую толщину стенки δ, если коэффициент теплопроводности материала λ = 20 Вт/(м·К).
2. Определить, как изменится температура стенки при увеличении толщины стенки в 2 раза.
3. Предложить способ снижения температуры стенки без изменения толщины.

Пример 5. Расчёт массовых выбросов NOx

Для камеры сгорания заданы:

- расход топлива Gт = 0,1 кг/с;
- температура в первичной зоне Т1 = 2000 К;
- давление в камере сгорания p = 1,2 МПа;
- время пребывания τ = 0,01 с.

Используя эмпирическую зависимость для расчёта эмиссионного индекса NOx (EINO = 0,03·exp(0,012·T1)·τ·p^0,5), рассчитать массовые выбросы NOx (г/с). Оценить соответствие выбросов нормативным требованиям ICAO (EINO < 40 г/кг топлива).

Пример 6. Сравнительный анализ типов камер сгорания

Провести сравнительный анализ трубчатой, трубчато-кольцевой и кольцевой камер сгорания по следующим критериям:

- масса и габариты;
- равномерность температурного поля на выходе;
- сложность отработки и доводки;
- стоимость изготовления;
- области применения.

Обосновать выбор типа камеры сгорания для:

- авиационного турбореактивного двигателя;
- стационарной газотурбинной установки;
- малоразмерного ГТД для БПЛА.