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

КОНСТРУИРОВАНИЕ ЛОПАТОЧНЫХ МАШИН

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 7
3.2. Тематический план изучения дисциплины 7
3.3. Содержание дисциплины 9
3.4. Тематика семинарских/практических и лабораторных занятий 10
3.4.1. Семинарские/практические занятия 10
3.4.2. Лабораторные занятия 11
3.5. Тематика курсовых проектов (курсовых работ) 11
4. Учебно-методическое и информационное обеспечение 12
4.1. Нормативные документы и ГОСТы 12
4.2. Основная литература 12
4.3. Дополнительная литература 13
4.4. Электронные образовательные ресурсы 13
4.5. Лицензионное и свободно распространяемое программное обеспечение 13
4.6. Современные профессиональные базы данных и информационные справочные системы 13
5. Материально-техническое обеспечение 15
6. Методические рекомендации 15
6.1. Методические рекомендации для преподавателя по организации обучения 15
6.2. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины 16
7. Фонд оценочных средств 17
7.1. Методы контроля и оценивания результатов обучения 17
7.2. Шкала и критерии оценивания результатов обучения 19
7.3. Оценочные средства 22

1. Цели, задачи и планируемые результаты обучения по дисциплине

Целью освоения дисциплины является формирование у обучающихся комплекса теоретических знаний и практических навыков, необходимых для эффективного проектирования, расчёта и конструирования лопаточных машин (компрессоров и турбин) поршневых двигателей и газотурбинных установок, включая методы газодинамического и прочностного анализа, выбора материалов, разработки конструкторской документации, а также выполнения курсового проекта, завершающегося созданием полностью спроектированной турбомашины на третьем и четвёртом этапах сквозного проектирования «Расчётное обоснование, верификация и оптимизация» и «Технологическая подготовка и экспериментальная верификация».

Задачами дисциплины являются:

В части теоретической подготовки:

- изучение принципов компоновки ротора и статора лопаточных машин различных типов (осевых и центробежных компрессоров, осевых и радиальных турбин), выбор конструктивных схем в зависимости от назначения и режимов работы;
- освоение методов профилирования лопаток компрессоров и турбин с использованием современных CAD-систем и специализированных программ;
- изучение методов прочностного расчёта деталей лопаточных машин: расчёт лопаток на статическую и циклическую прочность, расчёт дисков на прочность и долговечность, анализ колебаний лопаток и дисков;
- формирование знаний о конструктивных особенностях критических узлов: замковых соединений лопаток с диском, лабиринтных и концевых уплотнений, подшипниковых опор, систем смазки и охлаждения;
- изучение материалов, применяемых в лопаточных машинах (жаропрочные сплавы, титановые сплавы, композиционные материалы, теплозащитные покрытия), и их влияния на конструктивные решения.

В части формирования практических навыков:

- формирование навыков выполнения газодинамического расчёта ступени компрессора или турбины с определением основных геометрических параметров проточной части;
- освоение методов трёхмерного моделирования рабочих колёс, лопаток, дисков и корпусов лопаточных машин в CAD-системах;
- приобретение навыков проведения прочностного анализа деталей лопаточных машин с использованием CAE-систем (метод конечных элементов) для оценки напряжённо-деформированного состояния, усталостной долговечности и собственных частот колебаний;
- формирование умений выполнять расчёт и выбор подшипниковых узлов, уплотнений и элементов системы смазки;
- освоение методов обеспечения технологичности конструкции лопаточных машин, включая выбор методов получения заготовок (литьё, штамповка, механическая обработка) и назначение параметров термообработки;
- приобретение навыков оформления конструкторской документации на узлы и детали лопаточных машин (сборочные чертежи, рабочие чертежи деталей, спецификации) в соответствии с требованиями ЕСКД;
- выполнение курсового проекта, результатом которого является полностью спроектированная лопаточная машина с комплектом конструкторской документации.

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 во впускном тракте
	ИПК-2.5. Способен получать распределение давления и скорости потока, оценивать гидравлические потери
	ИПК-2.7. Способен выполнять верифицированный прочностной расчёт ответственной детали КШМ в CAE-среде на основе ранее рассчитанных динамических нагрузок
	ИПК-2.8. Способен проводить расчёт и анализ теплового состояния теплонапряжённого узла с применением методов сопряжённого теплообмена

Роль дисциплины в формировании компетенций:

Формирующая. Дисциплина «Конструирование лопаточных машин» является итоговой, интегрирующей для всего цикла дисциплин турбомашинного профиля, обеспечивая комплексное применение знаний и навыков, полученных при изучении предшествующих дисциплин, для выполнения полного цикла проектирования лопаточной машины. Компетенция ПК-2 формируется при выполнении расчётного обоснования проектных решений: построение расчётных сеток и CFD-моделирование течения в проточной части (ИПК-2.4, ИПК-2.5), прочностной анализ лопаток, дисков и валов в CAE-среде (ИПК-2.7), а также тепловой расчёт теплонапряжённых узлов турбины (ИПК-2.8). Дисциплина обеспечивает завершение третьего этапа сквозного проекта созданием полностью спроектированной лопаточной машины.

2. Место дисциплины в структуре образовательной программы

Дисциплина **«Конструирование лопаточных машин»** относится к **части блока Б.1, формируемой участниками образовательных отношений** учебного плана (код дисциплины: Б1.2.13) и изучается в **7-м семестре** с курсовым проектом.

Данная дисциплина является **кульминационным этапом сквозного проекта «Расчётное обоснование, верификация и оптимизация» и переходным к этапу «Технологическая подготовка и экспериментальная верификация»** в области турбомашин. Она интегрирует все знания и навыки, полученные при изучении предшествующих дисциплин, для выполнения комплексного проекта лопаточной машины с полным комплектом конструкторской документации.

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

- **Конструкция газотурбинных двигателей транспортного и энергетического назначения** (Б1.2.3, 4 семестр): знание конструктивных схем, устройства и принципов работы компрессоров и турбин является фундаментом для их самостоятельного проектирования.
- **Теория лопаточных машин** (Б1.1.24, 6 семестр): знание газодинамических процессов, методов расчёта треугольников скоростей, потерь и КПД является основой для определения геометрических параметров проточной части.

- **Вычислительная гидрогазодинамика в проектировании и верификации двигателей** (Б1.1.19, 4-5 семестры): знание методов CFD-моделирования и построения расчётных сеток необходимо для верификации газодинамических характеристик проектируемой лопаточной машины.
- **Конструкционные материалы поршневых двигателей и турбомашин** (Б1.1.13, 3 семестр): знание свойств жаропрочных, жаростойких и конструкционных материалов необходимо для обоснованного выбора материалов деталей лопаточной машины.
- **Сопротивление материалов** (Б1.1.15, 3-4 семестры): знание методов расчёта на прочность, жёсткость и устойчивость является основой для прочностного анализа лопаток, дисков и валов.
- **Инженерная механика машин и механизмов** (Б1.1.21, 4 семестр): знание динамики вращающихся масс, теории колебаний и методов уравновешивания необходимо для анализа динамических характеристик ротора.
- **Нормирование точности и метрология в энергетическом машиностроении** (Б1.1.14, 3 семестр): знание допусков и посадок необходимо для назначения точности сопрягаемых деталей.
- **Автоматизированное проектирование в двигателестроении** (Б1.1.12, 2-3 семестры): владение CAD-системами для создания трёхмерных моделей является необходимым инструментом для выполнения проектных работ.
- **Графическое проектирование деталей и механизмов энергетических машин** (Б1.1.9, 1-2 семестры): знание правил оформления конструкторской документации по ЕСКД необходимо для разработки чертежей и спецификаций.
- **Агрегаты наддува** (Б1.2.7, 6 семестр): знание конструкции и характеристик турбокомпрессоров позволяет ориентировать курсовой проект на создание конкретного узла системы наддува.
- **Расчет и оптимизация деталей двигателя** (Б1.2.9, 6 семестр): знание методов CAE-анализа необходимо для проведения прочностных и тепловых расчётов проектируемых деталей.

Основные положения дисциплины используются в дальнейшем при изучении следующих дисциплин и освоении элементов образовательной программы:

- **Разработка конструкторской документации на двигатели и их компоненты** (Б1.2.15, 7 семестр), изучаемая параллельно, позволяет довести оформление конструкторской документации на спроектированную лопаточную машину до полного комплекта в соответствии с ЕСКД.
- **Технологическая подготовка производства в машиностроении** (Б1.2.16, 7 семестр): спроектированные детали лопаточной машины являются объектом для разработки технологических процессов их изготовления.
- **Методы испытаний поршневых двигателей и турбомашин** (Б1.2.14, 7 семестр): спроектированная лопаточная машина может быть объектом экспериментальной верификации её характеристик.
- **Диагностика и техническая эксплуатация поршневых двигателей и турбомашин** (Б1.2.18, 8 семестр): знание конструкции лопаточных машин необходимо для анализа причин отказов и разработки методов диагностики.
- **Интеграция и оформление проектных решений** (Б1.2.19, 8 семестр): результаты курсового проектирования интегрируются в общий сквозной проект и оформляются в виде, готовом к защите.
- **Подготовка к процедуре защиты и защита выпускной квалификационной работы** (Б3.1, 8 семестр): результаты курсового проекта по конструированию лопаточной машины могут быть использованы в качестве основной части выпускной квалификационной работы.

3. Структура и содержание дисциплины

Общая трудоемкость дисциплины составляет **5 зачетных единиц (180 часов)**.

3.1. Виды учебной работы и трудоемкость

№ п/п	Вид учебной работы	Количество часов	Семестры
			7
1	Аудиторные занятия	72	72
	В том числе:		
1.1	Лекции	36	36
1.2	Семинарские/практические занятия	36	36
1.3	Лабораторные занятия	—	—
2	Самостоятельная работа	108	108
3	Промежуточная аттестация		
	Зачет/диф.зачет/экзамен	Экзамен	Экзамен
	Курсовой проект	Курсовой проект	Курсовой проект
	Итого	**180**	**180**

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	**Конструирование лопаточных машин**						
1	Тема 1. Введение. Общие принципы конструирования лопаточных машин	12	6	2	4	—	6
2	Тема 2. Проектирование проточной части компрессора	24	10	4	6	—	14

№ п/п	Название раздела / темы	Всего часов	Аудиторная работа	Лекции	Семинарские/ практические занятия	Лабораторные занятия	Самостоятельная работа
3	Тема 3. Проектирование проточной части турбины	24	10	4	6	—	14
4	Тема 4. Профилирование лопаток компрессора и турбины	20	8	4	4	—	12
5	Тема 5. Прочностной расчет деталей лопаточных машин	24	10	4	6	—	14
6	Тема 6. Конструкция и расчет подшипниковых узлов и уплотнений	18	8	4	4	—	10
7	Тема 7. Материалы и технологии изготовления лопаточных машин	16	6	4	2	—	10
8	Тема 8. Сборка и испытания лопаточных машин	12	4	2	2	—	8
9	Выполнение курсового проекта	30	—	—	—	—	30
10	Подготовка к экзамену	4	—	—	—	—	4
	Итого за 1 семестр	**184**	**62**	**28**	**34**	**—**	**122**

Примечание: невязка в 4 часа (184-180) связана с необходимостью распределения часов на допуск к экзамену и защиту курсового проекта.

3.3. Содержание дисциплины

Семестр 7. Конструирование лопаточных машин

Тема 1. Введение. Общие принципы конструирования лопаточных машин

Роль дисциплины в сквозном проекте: интеграция знаний для создания полностью спроектированной лопаточной машины. Этапы проектирования лопаточной машины: газодинамический расчет, конструктивная проработка, прочностной расчет, оформление КД. Компоновка ротора и статора. Выбор конструктивной схемы: одновальная, двухвальная, трехвальная. Осевые зазоры, радиальные зазоры. Влияние зазоров на КПД. Требования к надёжности, ресурсу, технологичности. Связь с дисциплинами «Теория лопаточных машин», «Агрегаты наддува», «Конструкционные материалы».

Тема 2. Проектирование проточной части компрессора

Выбор типа компрессора (осевой, центробежный, комбинированный) в зависимости от назначения и требуемой степени повышения давления. Газодинамический расчет ступени (по треугольникам скоростей). Определение диаметров на входе и выходе, осевых скоростей. Расчет количества ступеней для осевого компрессора. Расчет геометрии рабочего колеса центробежного компрессора: входной диаметр, выходной диаметр, ширина канала, угол лопаток. Расчет диффузора и улитки. Особенности проектирования для турбокомпрессоров и малоразмерных ГТД.

Тема 3. Проектирование проточной части турбины

Выбор типа турбины (осевая, радиальная) в зависимости от расхода газа и степени понижения давления. Газодинамический расчет ступени (по треугольникам скоростей). Определение диаметров на входе и выходе. Расчет соплового аппарата: определение углов выхода потока, высота лопаток. Расчет рабочего колеса: определение углов входа и выхода лопаток, высота лопаток. Особенности проектирования радиальной турбины. Согласование параметров турбины с компрессором в турбокомпрессоре.

Тема 4. Профилирование лопаток компрессора и турбины

Методы построения профилей лопаток. Профилирование по дугам окружностей. Использование аэродинамических профилей (NACA, ЦАГИ). Построение решетки профилей. Параметрическое моделирование лопатки в CAD-системе. Профилирование лопаток центробежного компрессора. Профилирование лопаток радиальной турбины. Профилирование лопаток осевой турбины с охлаждением. Учет технологических требований при профилировании (толщина выходной кромки, радиусы скруглений).

Тема 5. Прочностной расчет деталей лопаточных машин

Расчет лопаток на статическую и циклическую прочность. Определение центробежных сил, газодинамических нагрузок. Температурные напряжения. Расчет лопаток на собственные частоты колебаний. Избежание резонанса. Расчет дисков компрессора и турбины на прочность (методом конечных элементов). Расчет замковых соединений (ёлочный, Т-образный). Расчет валов на кручение и изгиб. Определение запасов прочности. Использование CAE-систем для прочностного анализа.

Тема 6. Конструкция и расчет подшипниковых узлов и уплотнений

Выбор типа подшипников для ротора лопаточной машины: подшипники скольжения (плавающие вкладыши), подшипники качения. Особенности работы подшипников при высоких скоростях и температурах. Расчет подшипников скольжения на жидкостное трение. Расчет подшипников качения на долговечность. Система смазки подшипникового узла. Уплотнения вала: лабиринтные, концевые, с плавающими кольцами. Расчет утечек через уплотнения. Конструктивные схемы расположения подшипников (с опорами между колесами, с выносными опорами).

Тема 7. Материалы и технологии изготовления лопаточных машин

Выбор материалов для деталей лопаточной машины в зависимости от условий работы. Жаропрочные никелевые и кобальтовые сплавы для лопаток турбины и дисков. Титан и титановые сплавы для лопаток компрессора. Высокопрочные стали для валов. Технологии изготовления: точное литьё по выплавляемым моделям (лопатки), штамповка, механическая

обработка на станках с ЧПУ (диски, валы, корпуса). Обработка лопаток: фрезерование, шлифование. Защитные и упрочняющие покрытия. Влияние технологических факторов на конструктивные решения.

Тема 8. Сборка и испытания лопаточных машин

Технология сборки ротора лопаточной машины. Балансировка ротора (статическая, динамическая). Сборка статора. Контроль осевых и радиальных зазоров. Испытания лопаточной машины: снятие характеристик (расход, степень повышения давления, КПД). Виброиспытания. Испытания на ресурс. Диагностика неисправностей. Оформление эксплуатационной документации.

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 1	Компоновка ротора и статора лопаточной машины. Выбор конструктивной схемы	2
2	Тема 2	Газодинамический расчет ступени центробежного компрессора (определение основных размеров)	4
3	Тема 2	Газодинамический расчет ступени осевого компрессора (определение основных размеров)	2
4	Тема 3	Газодинамический расчет ступени радиальной турбины (определение основных размеров)	4
5	Тема 3	Газодинамический расчет ступени осевой турбины (определение основных размеров)	2
6	Тема 4	Построение профиля лопатки компрессора в CAD-системе	2
7	Тема 4	Построение профиля лопатки турбины в CAD-системе	2
8	Тема 4	Создание 3D-модели рабочего колеса центробежного компрессора	2
9	Тема 5	Прочностной расчет лопатки (центробежные силы, напряжения)	2
10	Тема 5	Прочностной расчет диска компрессора (в CAE-системе)	2
11	Тема 5	Определение собственных частот колебаний лопатки	2
12	Тема 6	Выбор и расчет подшипников скольжения для ротора турбокомпрессора	2
13	Тема 6	Расчет лабиринтного уплотнения (определение утечек)	2
14	Тема 7	Выбор материалов для деталей турбокомпрессора	2

№ п/п	№ раздела дисциплины	Наименование практического занятия	Трудоемкость (час.)
15	Тема 8	Разработка технологической схемы сборки ротора	2
16	Тема 1-8	Комплексное конструирование узла (рабочее колесо + вал)	2
	Итого		**36**

3.4.2. Лабораторные занятия

Лабораторные работы по дисциплине не предусмотрены.

3.5. Тематика курсовых проектов (курсовых работ)

Курсовой проект выполняется в 7-м семестре и является **завершающим этапом сквозного проекта** в области турбомашин.

Примерные темы курсовых проектов:

1. Проектирование центробежного компрессора для турбокомпрессора дизельного двигателя мощностью ___ кВт.
2. Проектирование радиальной турбины для турбокомпрессора бензинового двигателя с рабочим объемом ___ л.
3. Проектирование осевой турбины для малоразмерного газотурбинного двигателя мощностью ___ кВт.
4. Проектирование одноступенчатого центробежного компрессора для наддува двигателя мощностью ___ кВт.
5. Проектирование радиальной турбины с изменяемой геометрией (VGT) для турбокомпрессора
6. Проектирование осевого компрессора для вспомогательной силовой установки (ВСУ).
7. Проектирование турбокомпрессора (компрессор + турбина) для двигателя с параметрами ___.
8. Разработка конструкции и прочностной расчет рабочего колеса центробежного компрессора.
9. Разработка конструкции и газодинамический расчет ступени осевой турбины.
10. Комплексное проектирование узла «рабочее колесо — вал — подшипниковый узел» для турбокомпрессора.

Структура курсового проекта:

- Введение (актуальность, цель и задачи работы).
- Выбор и обоснование исходных данных (тип двигателя, параметры наддува, расход воздуха).
- Газодинамический расчет (определение основных размеров проточной части, треугольников скоростей, КПД).
- Конструктивная разработка (3D-моделирование рабочего колеса, корпуса, вала; сборочная модель).
- Прочностной расчет (определение напряжений в рабочем колесе, диске, лопатках; оценка запасов прочности).
- Расчет подшипникового узла и уплотнений (выбор типа, проверка работоспособности).
- Выбор материалов и технология изготовления.
- Заключение с выводами по работе.
- Список использованной литературы.

- Графическая часть: сборочный чертеж турбокомпрессора (или его узла), рабочие чертежи 2-3 оригинальных деталей (рабочее колесо компрессора, вал, корпус), 3D-модели в электронном виде.

4. Учебно-методическое и информационное обеспечение

4.1. Нормативные документы и ГОСТы

1. ГОСТ 25.101-83
«Расчёты и испытания на прочность. Методы расчёта и испытаний на усталостную прочность»
Используется для оценки долговечности и усталостной прочности деталей ГТД, а также для правильного выбора материалов и расчётных параметров.
2. ГОСТ 25.504-82
«Расчёты и испытания на прочность. Методы расчёта на прочность лопаток паровых и газовых турбин»
Важен для расчёта прочности лопаток газотурбинных двигателей, поскольку именно эта часть испытывает наибольшее воздействие термических и механических нагрузок.
3. ГОСТ 25.502-80
«Расчёты и испытания на прочность. Методы испытаний на ползучесть и длительную прочность»
Необходимо для изучения и учёта эффектов ползучести, длительного нагружения и установления долговременной прочности материалов ГТД.
4. ГОСТ 25.503-97
«Расчёты и испытания на прочность. Методы испытаний на статическую прочность»
Помогает освоить правильные методы испытаний на статическую прочность деталей и узлов ГТД, что крайне важно для безопасной эксплуатации.
5. ГОСТ 25.505-80
«Расчёты и испытания на прочность. Методы испытаний на релаксацию напряжений»
Рекомендуется для глубокого понимания процесса релаксации напряжений, возникающего в деталях ГТД при длительном воздействии нагрузок.
6. ГОСТ 25.506-85
«Расчёты и испытания на прочность. Методы расчёта и испытаний на вибропрочность»
Обязателен для студентов, изучающих динамику и вибростойкость элементов газотурбинных двигателей, таких как лопатки и диски.
7. ГОСТ 25.507-85
«Расчёты и испытания на прочность. Методы испытания на многократную изгибающую усталость»
Особенно важен для расчёта элементов, подверженных циклическим нагрузкам, таким как лопатки компрессора и турбины.
8. ГОСТ 25.508-94
«Расчёты и испытания на прочность. Методы испытаний на усталостную прочность при пульсирующем растяжении»
Будет полезен при изучении вопроса долговечности элементов ГТД, испытывающих пульсирующее растягивающее усилие.
9. ГОСТ 25.509-85
«Расчёты и испытания на прочность. Методы испытаний на выносливость при повторно-статическом нагружении»
Является полезным документом для изучения вопросов, связанных с усталостью и пределом выносливости элементов газотурбинных двигателей.
10. ГОСТ 25.501-97
«Расчёты и испытания на прочность. Методы расчёта и испытаний на растяжение»
Используется для изучения методов расчёта и проведения испытаний на растяжение материалов, применяемых в производстве деталей ГТД.

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

Конструирование, динамика и прочность энергетических машин и установок
https://online.mospolytech.ru/course/view.php?id=9379

4.5. Лицензионное и свободно распространяемое программное обеспечение

Для проведения занятий по дисциплине необходимо следующее ПО:
Операционная система Windows 7 и выше, Офисные приложения Microsoft Office.

4.6. Современные профессиональные базы данных и информационные справочные системы

Для освоения дисциплины рекомендуются следующие сайты информационно-телекоммуникационной сети «Интернет»:
http://минобрнауки.рф/ - Министерство образования и науки РФ;
http://fcior.edu.ru/ - Федеральный центр информационно-образовательных ресурсов;
http://fgosvo.ru/ - Портал Федеральных государственных образовательных стандартов;
http://www.consultant.ru/ - Справочная правовая система «Консультант Плюс»;
http://www.garant.ru/ - Справочная правовая система «Гарант»;
http://www.edu.ru/ - Российское образование. Федеральный портал;
http://www.opengost.ru/ - Сайт, содержащий полные тексты нормативных документов.
Перечень информационных систем:

Научная библиотека Московского политехнического университета. http://lib.mami.ru/lib/content/elektronnyy-katalog

База данных содержит в себе 102678 учебных материалов различной направленности 1939 из которых полнотекстовые. Доступ к электронному каталогу можно получить с любого устройства, имеющим подключение к интернету.

Электронный каталог БИЦ МГУП.

http://mgup.ru/library/

Электронный каталог позволяет производить поиск по базе данных библиотеки МГУП.

ЭБС издательства «ЛАНЬ».

https://e.lanbook.com/

ЭБС «ЛАНЬ» - ресурс, предоставляющий online-доступ к научным журналам и полнотекстовым коллекциям книг различных издательств.

Доступ к ЭБС издательства «ЛАНЬ» осуществляется со всех компьютеров университета.

ЭБС «Polpred».

http://polpred.com/news

ЭБС представляет собой архив важных публикаций, собираемых вручную. База данных с рубрикатором: 53 отрасли/ 600 источников/ 9 федеральных округов РФ/ 235 стран и территорий/ главные материалы/ статьи и интервью 8000 первых лиц. Для доступа к полным текстам ЭБС с компьютеров на территории учебных корпусов университета авторизация не требуется.

«КиберЛенинка» - научная библиотека открытого доступа.

http://cyberleninka.ru/

Это научная электронная библиотека открытого доступа (Open Access).

Библиотека комплектуется научными статьями, публикациями в журналах России и ближнего зарубежья. Научные тексты, представленные в библиотеке, размещаются в интернете бесплатно, в открытом доступе. Пользователям библиотеки предоставляется возможность читать научные работы с экрана планшета, мобильного телефона и других современных мобильных устройств.

Научная электронная библиотека «eLIBRARY.RU».

http://elibrary.ru/defaultx.asp

Крупнейшая в России электронная библиотека научных публикаций, обладающая богатыми возможностями поиска и анализа научной информации. Библиотека интегрирована с Российским индексом научного цитирования (РИНЦ) - созданным по заказу Минобрнауки РФ бесплатным общедоступным инструментом измерения публикационной активности ученых и организаций.

Реферативная и наукометрическая электронная база данных «Scopus».

https://www.scopus.com/home.uri

Индексирует не менее 20500 реферируемых научных журналов, которые издаются не менее чем 5000 издательствами и содержат не менее 47 млн. библиографических записей, из которых не менее 24 млн. включают в себя списки цитируемой литературы.

База данных «Knovel» издательства «Elsevir».

https://app.knovel.com/web/

Полнотекстовая база данных для поиска инженерной информации и поддержки принятия инженерных решений.

Доступ к электронным базам данных «Scopus» и «Knovel» осуществляется круглосуточно через сеть Интернет в режиме он-лайн по IP-адресам, используемым университетом для выхода в сеть Интернет.

Поисковые интернет-системы: Google, Yandex, Yahoo, Mail, Rambler, Bing и др.

Информационная система предоставляет свободный доступ к каталогу образовательных Интернет-ресурсов и полнотекстовой электронной учебно- методической библиотеке для общего и профессионального образования. Доступ с любого компьютера, подключенного к Интернет.

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.
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).

Особое место уделяется консультированию как форме обучения и контроля. Консультирование предполагает взаимодействие между преподавателем и студентами, направленное на разрешение проблем.

Для успешного освоения дисциплины рекомендуется:

- систематически посещать лекции, вести конспект;
- готовиться к практическим занятиям заранее, изучая теорию и выполняя задания;
- при наличии лабораторных работ — выполнять их в соответствии с методическими указаниями, оформлять отчёты и готовиться к защите;
- своевременно выполнять задания для самостоятельной работы;
- активно участвовать в обсуждениях, задавать вопросы;
- использовать СДО-LMS для доступа к материалам и выполнения тестов;
- регулярно проверять свои знания с помощью вопросов для самопроверки.

При подготовке к текущему контролю и промежуточной аттестации рекомендуется:

- повторить теоретический материал по соответствующим разделам;
- выполнить практические задания, аналогичные разобранным на занятиях;
- ознакомиться с критериями оценивания;
- систематизировать материал, составить краткий план ответов;
- при необходимости посетить консультацию преподавателя.

Соблюдение данных рекомендаций позволит качественно освоить учебный материал и успешно пройти все формы контроля.

7. Фонд оценочных средств

Для осуществления процедур текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации студентов предусмотрен фонд оценочных средств (ФОС), позволяющий оценить достижение запланированных результатов обучения и уровень сформированности всех компетенций. Фонд оценочных средств состоит из комплектов контрольно-оценочных средств. Комплекты контрольно-оценочных средств включают в себя контрольно-оценочные материалы, позволяющие оценить знания, умения и уровень приобретенных компетенций.

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 (экзамена). Дисциплина «Конструирование лопаточных машин» является итоговой, интегрирующей для всего цикла дисциплин турбомашинного профиля, обеспечивая комплекс теоретических знаний и практических навыков, необходимых для эффективного проектирования, расчёта и конструирования лопаточных машин (компрессоров и турбин) поршневых двигателей и газотурбинных установок, включая методы газодинамического и прочностного анализа, выбора материалов, разработки конструкторской документации, а также выполнения курсового проекта, завершающегося созданием полностью спроектированной турбомашины на третьем и четвёртом этапах сквозного проектирования «Расчётное обоснование, верификация и оптимизация» и «Технологическая подготовка и экспериментальная верификация».

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 во впускном тракте.
- **ИПК-2.5.** Способен получать распределение давления и скорости потока, оценивать гидравлические потери.
- **ИПК-2.7.** Способен выполнять верифицированный прочностной расчёт ответственной детали КШМ в CAE-среде на основе ранее рассчитанных динамических нагрузок.
- **ИПК-2.8.** Способен проводить расчёт и анализ теплового состояния теплонапряжённого узла с применением методов сопряжённого теплообмена.

Дисциплина «Конструирование лопаточных машин» является кульминационным этапом сквозного проекта «Расчётное обоснование, верификация и оптимизация» и переходным к этапу «Технологическая подготовка и экспериментальная верификация» в области турбомашин. Она интегрирует все знания и навыки, полученные при изучении предшествующих дисциплин, для выполнения комплексного проекта лопаточной машины с полным комплектом конструкторской документации. В ходе изучения дисциплины студент осваивает принципы компоновки ротора и статора лопаточных машин, методы профилирования лопаток, прочностной расчёт деталей, конструкцию подшипниковых узлов и уплотнений, материалы и технологии изготовления, а также вопросы сборки и испытаний.

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 принципов конструирования лопаточных машин, методов газодинамического и прочностного расчёта, правил выбора материалов, конструктивных особенностей узлов, а также методов сборки и испытаний. Результаты тестирования используются для оценки уровня освоения материала модуля и определения готовности студента к выполнению курсового проекта. Проверяемые индикаторы: ИПК-2.4, ИПК-2.5, ИПК-2.7, ИПК-2.8.

Устный опрос (собеседование)

Проводится в ходе практических занятий для проверки понимания студентом теоретического материала, способности аргументированно излагать принципы конструирования лопаточных машин, методы расчёта, обосновывать выбор конструктивных решений, материалов, схем сборки. 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 обосновывать принимаемые конструктивные решения. Проверяемые индикаторы: ИПК-2.4, ИПК-2.5, ИПК-2.7, ИПК-2.8.

Практические занятия

В ходе выполнения практических заданий (компоновка ротора и статора, газодинамический расчёт ступени, построение профиля лопатки, создание 3D-модели рабочего колеса, прочностной расчёт лопатки и диска, выбор и расчёт подшипников, расчёт уплотнений, выбор материалов, разработка технологической схемы сборки) 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, необходимых для выполнения курсового проекта. Проверяемые индикаторы: ИПК-2.4, ИПК-2.5, ИПК-2.7, ИПК-2.8.

Курсовой проект

Курсовой проект выполняется в 7-м семестре и является завершающим этапом сквозного проекта в области турбомашин. Курсовой проект направлен на комплексное применение навыков проектирования, расчёта и конструирования для создания полностью спроектированной лопаточной машины. Выполнение курсового проекта позволяет оценить

способность студента самостоятельно выполнять газодинамический расчёт, создавать параметрические 3D-модели деталей и сборочных единиц, выполнять прочностной анализ, выбирать материалы, разрабатывать конструкторскую документацию в соответствии с ЕСКД. Проверяемые индикаторы: ИПК-2.4, ИПК-2.5, ИПК-2.7, ИПК-2.8.

Экзамен

Промежуточная аттестация проводится в форме экзамена по завершении изучения дисциплины. Экзамен позволяет комплексно оценить знания, умения и навыки студента по всем разделам дисциплины, а также результаты выполнения курсового проекта. Экзаменационный билет включает два теоретических вопроса (по основным разделам конструирования лопаточных машин) и одно практическое задание (расчётная задача или анализ конструктивного решения). Результаты экзамена определяют итоговую оценку по дисциплине и отражают степень сформированности компетенций, необходимых для выполнения третьего и четвёртого этапов сквозного проекта. Проверяемые индикаторы: ИПК-2.4, ИПК-2.5, ИПК-2.7, ИПК-2.8.

Роль дисциплины в оценке результатов сквозного проекта

Дисциплина «Конструирование лопаточных машин» является кульминационным этапом сквозного проекта в области турбомашин. В рамках этого этапа студент должен выполнить полный цикл проектирования лопаточной машины: от газодинамического расчёта до выпуска конструкторской документации. Результаты освоения дисциплины оцениваются в ходе защиты курсового проекта и отчёта по третьему и четвёртому этапам сквозного проекта. Оценка сформированности компетенции ПК-2 по дисциплине является определяющей при подведении итогов выполнения сквозного проекта в целом.

7.2. Шкала и критерии оценивания результатов обучения

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 конструирования лопаточных машин, знает методы газодинамического и прочностного расчёта, понимает принципы выбора материалов и конструктивных решений. Это свидетельствует о сформированности на пороговом уровне индикаторов ПК-2 в части теоретических основ конструирования лопаточных машин.

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 методах расчёта и принципах конструирования. Студент обязан ликвидировать задолженность по модулю до выполнения курсового проекта.

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 принципов компоновки ротора и статора лопаточных машин, методов профилирования лопаток, прочностного расчёта деталей, конструктивных особенностей подшипниковых узлов и уплотнений, материалов и технологий изготовления, а также вопросов сборки и испытаний. Уверенно и аргументированно отвечает на дополнительные вопросы, свободно владеет профессиональной терминологией. В контексте сквозного проекта такой уровень подготовки позволяет студенту самостоятельно выполнять полный цикл проектирования лопаточной машины.

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 выполнять расчёты, но может испытывать затруднения при ответе на уточняющие вопросы или при объяснении сложных разделов. 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 выполнении расчётов, 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 выполнить элементарные расчёты. Отсутствует понимание принципов конструирования лопаточных машин. Не способен ответить на дополнительные вопросы, не владеет профессиональной терминологией. Студент не готов к выполнению курсового проекта.

Критерии оценки практических занятий

Оценка «зачтено» выставляется студенту, который выполнил практическое задание правильно, в установленные сроки. Студент продемонстрировал понимание методики выполнения задания, способность применять теоретические знания для газодинамического расчёта, построения 3D-модели, прочностного анализа, выбора материалов. При защите студент аргументирует полученные результаты, отвечает на уточняющие вопросы, демонстрирует владение профессиональной терминологией. В рамках сквозного проекта успешное выполнение практических заданий позволяет студенту освоить методы, необходимые для выполнения курсового проекта.

Оценка «не зачтено» выставляется студенту, который не выполнил практическое задание, выполнил его не в полном объёме, или выполнил с грубыми ошибками. Студент не понимает методику выполнения, 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.

Критерии оценки курсового проекта

Курсовой проект выполняется в 7-м семестре. Оценка выставляется по результатам защиты выполненного проекта. Защита проводится в форме устной презентации результатов с последующим ответом на вопросы преподавателя. Максимальная оценка — 5 баллов (отлично). Критерии оценки включают полноту выполнения задания, качество созданных 3D-моделей, правильность газодинамического и прочностного расчётов, качество оформления чертежей и спецификаций, соответствие требованиям ЕСКД, качество пояснительной записки, обоснованность принятых решений.

Оценка «отлично» выставляется студенту, который полностью выполнил курсовой проект в соответствии с требованиями. Студент демонстрирует глубокое понимание конструкции лопаточной машины, самостоятельно выполняет газодинамический расчёт, создаёт параметрические 3D-модели всех деталей со всеми конструктивными элементами, формирует сборочную единицу с корректными сопряжениями, выполняет прочностной анализ с обоснованием запасов прочности. Ассоциативные чертежи выполнены в полном соответствии с требованиями ЕСКД, виды, разрезы и сечения выбраны корректно, размеры нанесены правильно, обозначены шероховатость и допуски, спецификация составлена в соответствии с требованиями. Пояснительная записка оформлена в соответствии с требованиями, содержит полный анализ конструкции, обоснование выбора материалов и конструктивных решений. При защите студент свободно владеет материалом, аргументированно отвечает на вопросы, демонстрирует понимание взаимосвязей между конструктивными элементами. Сформированность индикаторов ПК-2 оценивается на продвинутом уровне. Результаты курсового проекта могут быть использованы в качестве основы для выпускной квалификационной работы.

Оценка «хорошо» выставляется студенту, который выполнил курсовой проект в полном объёме, но допускает отдельные неточности в моделях или незначительные отступления от требований ЕСКД в чертежах. Студент демонстрирует понимание конструкции, владеет основными методами расчёта и конструирования, но может испытывать затруднения при обосновании выбора материалов или при выполнении прочностного анализа. 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 курсовой проект, но допустил существенные ошибки в расчётах или не полностью выполнил требуемые разделы. Студент демонстрирует фрагментарные знания методов конструирования, испытывает значительные затруднения при выполнении расчётов. Чертежи оформлены с нарушениями требований ЕСКД. Пояснительная записка оформлена с нарушениями. При защите студент отвечает на вопросы неуверенно, требует наводящих вопросов. Сформированность индикаторов оценивается на пороговом уровне. Результаты курсового проекта требуют доработки для использования в выпускной квалификационной работе.

Оценка «неудовлетворительно» выставляется студенту, который не выполнил курсовой проект, выполнил его не в полном объёме или допустил грубые ошибки. Студент не демонстрирует понимания методов конструирования лопаточных машин, не владеет навыками расчёта. Модели отсутствуют или выполнены с грубыми ошибками, сборка неработоспособна. Чертежи отсутствуют или выполнены с грубыми нарушениями. 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 курсовой проект повторно в установленные преподавателем сроки.

Критерии оценки ответа на экзамене

Оценка «отлично» выставляется студенту, который глубоко и прочно усвоил программный материал по всем разделам, исчерпывающе и логически стройно излагает ответы на теоретические вопросы. Студент демонстрирует полное знание принципов компоновки лопаточных машин, методов газодинамического и прочностного расчёта, конструктивных особенностей узлов, материалов и технологий. Уверенно и без ошибок выполняет практическое задание, аргументирует последовательность решения, делает обоснованные выводы. Даёт полные ответы на дополнительные вопросы, свободно владеет профессиональной терминологией. Сформированность индикаторов ПК-2 оценивается на продвинутом уровне, что подтверждает готовность студента к выполнению курсового проекта и последующих этапов сквозного проекта.

Оценка «хорошо» выставляется студенту, который твердо знает материал, грамотно и по существу излагает ответы на теоретические вопросы, не допуская существенных неточностей. Студент владеет основными понятиями и методами, умеет выполнять расчёты. Выполняет практическое задание в целом правильно, но может испытывать затруднения при обосновании отдельных этапов. На дополнительные вопросы отвечает в целом правильно, но допускает несущественные ошибки. Сформированность индикаторов оценивается на базовом уровне.

Оценка «удовлетворительно» выставляется студенту, который имеет знания только основного материала, допускает неточности и ошибки в изложении теоретических вопросов. Студент обладает фрагментарными знаниями по отдельным разделам. Выполняет практическое задание с помощью наводящих вопросов или допускает ошибки в расчётах. Ответы на дополнительные вопросы даются с трудом, профессиональная терминология используется недостаточно уверенно. Сформированность индикаторов оценивается на пороговом уровне.

Оценка «неудовлетворительно» выставляется студенту, который не знает значительной части программного материала, допускает грубые ошибки в изложении теоретических вопросов. Студент не может выполнить практическое задание или выполняет его с грубыми

ошибками, не понимает сути задания. Не способен ответить на дополнительные вопросы, не владеет профессиональной терминологией. Сформированность индикаторов не достигла порогового уровня, что делает невозможным выполнение курсового проекта и завершение сквозного проекта.

7.3. Оценочные средства

Текущий контроль

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) — Проектирование проточной части. Профилирование лопаток. Прочностной расчёт

Включает темы: Тема 1. Введение. Общие принципы конструирования лопаточных машин; Тема 2. Проектирование проточной части компрессора; Тема 3. Проектирование проточной части турбины; Тема 4. Профилирование лопаток компрессора и турбины; Тема 5. Прочностной расчет деталей лопаточных машин.

Модуль 2 (недели 9–16) — Конструкция узлов. Материалы и технологии. Сборка и испытания. Курсовой проект

Включает темы: Тема 6. Конструкция и расчет подшипниковых узлов и уплотнений; Тема 7. Материалы и технологии изготовления лопаточных машин; Тема 8. Сборка и испытания лопаточных машин; Тема 9. Выполнение курсового проекта.

Рубежный контроль по модулям (устный опрос/собеседование)

Модуль 1. Проектирование проточной части. Профилирование лопаток. Прочностной расчёт

Перечень вопросов для собеседования:

1. Роль дисциплины в сквозном проекте: интеграция знаний для создания полностью спроектированной лопаточной машины. Этапы проектирования лопаточной машины.
2. Компоновка ротора и статора лопаточной машины. Выбор конструктивной схемы: одновальная, двухвальная, трехвальная. Осевые зазоры, радиальные зазоры, их влияние на КПД.
3. Выбор типа компрессора (осевой, центробежный, комбинированный) в зависимости от назначения и требуемой степени повышения давления.
4. Газодинамический расчет ступени центробежного компрессора: определение диаметров на входе и выходе, осевых скоростей, углов лопаток.
5. Расчет геометрии рабочего колеса центробежного компрессора: входной диаметр, выходной диаметр, ширина канала, угол лопаток.
6. Расчет диффузора и улитки центробежного компрессора. Особенности проектирования для турбокомпрессоров и малоразмерных ГТД.
7. Выбор типа турбины (осевая, радиальная) в зависимости от расхода газа и степени понижения давления.
8. Газодинамический расчет ступени радиальной турбины: определение диаметров, углов лопаток, высоты каналов.
9. Газодинамический расчет ступени осевой турбины: определение параметров соплового аппарата и рабочего колеса.
10. Согласование параметров турбины с компрессором в турбокомпрессоре.
11. Методы построения профилей лопаток. Профилирование по дугам окружностей. Использование аэродинамических профилей (NACA, ЦАГИ).
12. Построение решетки профилей. Параметрическое моделирование лопатки в CAD-системе.
13. Профилирование лопаток центробежного компрессора и радиальной турбины. Профилирование лопаток осевой турбины с охлаждением.

14. Учет технологических требований при профилировании (толщина выходной кромки, радиусы скруглений).

15. Расчет лопаток на статическую и циклическую прочность. Определение центробежных сил, газодинамических нагрузок. Температурные напряжения.

16. Расчет лопаток на собственные частоты колебаний. Избежание резонанса. Расчет дисков компрессора и турбины на прочность (методом конечных элементов).

17. Расчет замковых соединений (ёлочный, Т-образный). Расчет валов на кручение и изгиб. Определение запасов прочности. Использование CAE-систем для прочностного анализа.

Модуль 2. Конструкция узлов. Материалы и технологии. Сборка и испытания. Курсовой проект

Перечень вопросов для собеседования:

1. Выбор типа подшипников для ротора лопаточной машины: подшипники скольжения (плавающие вкладыши), подшипники качения. Особенности работы подшипников при высоких скоростях и температурах.

2. Расчет подшипников скольжения на жидкостное трение. Расчет подшипников качения на долговечность. Система смазки подшипникового узла.

3. Уплотнения вала: лабиринтные, концевые, с плавающими кольцами. Расчет утечек через уплотнения. Конструктивные схемы расположения подшипников.

4. Выбор материалов для деталей лопаточной машины в зависимости от условий работы. Жаропрочные никелевые и кобальтовые сплавы для лопаток турбины и дисков.

5. Титан и титановые сплавы для лопаток компрессора. Высокопрочные steels для валов. Технологии изготовления: точное литьё по выплавляемым моделям (лопатки), штамповка, механическая обработка на станках с ЧПУ.

6. Обработка лопаток: фрезерование, шлифование. Защитные и упрочняющие покрытия. Влияние технологических факторов на конструктивные решения.

7. Технология сборки ротора лопаточной машины. Балансировка ротора (статическая, динамическая). Сборка статора. Контроль осевых и радиальных зазоров.

8. Испытания лопаточной машины: снятие характеристик (расход, степень повышения давления, КПД). Виброиспытания. Испытания на ресурс. Диагностика неисправностей.

9. Оформление эксплуатационной документации. Структура и содержание курсового проекта. Требования к пояснительной записке и графической части.

10. Состав графической части курсового проекта: сборочный чертеж турбокомпрессора (или его узла), рабочие чертежи 2-3 оригинальных деталей. Особенности выполнения 3D-моделей для курсового проекта.

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. Максимальное 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 замкового соединения лопаток с диском турбины обеспечивает наименьшую концентрацию напряжений?**

2. A) Т-образный замок

3. B) Пальцевый замок

4. C) Ёлочный замок

5. D) Сварка

Правильный ответ: C

2. **Какой параметр является определяющим при выборе типа подшипника для ротора турбокомпрессора?**

3. A) Стоимость подшипника
4. B) Частота вращения ротора
5. C) Температура окружающей среды
6. D) Материал корпуса

Правильный ответ: B

3. **Какой метод обработки лопаток турбины обеспечивает наибольшую точность профиля?**
4. A) Литьё
5. B) Штамповка
6. C) Фрезерование на станках с ЧПУ
7. D) Электроэрозионная обработка

Правильный ответ: C

4. **Какой тип уплотнения наиболее эффективен для предотвращения утечек газа в зазоре между ротором и статором?**
5. A) Лабиринтное уплотнение
6. B) Концевое уплотнение
7. C) Уплотнение с плавающими кольцами
8. D) Манжетное уплотнение

Правильный ответ: A

5. **Какая операция выполняется для устранения дисбаланса ротора после сборки?**
6. A) Статическая балансировка
7. B) Динамическая балансировка
8. C) Виброиспытания
9. D) Обкатка

Правильный ответ: B

Оценочные средства для индивидуального задания в рамках сквозного проекта

Индивидуальное задание в рамках сквозного проекта в 7-м семестре является составной частью курсового проекта и представляет собой этап подготовки к выполнению полного проекта лопаточной машины. Задание выполняется студентом самостоятельно в рамках курсового проекта.

Содержание индивидуального задания:

Индивидуальное задание включает в себя выполнение следующих этапов (в рамках подготовки к курсовому проекту):

1. **Анализ исходных данных и выбор конструктивной схемы.** Студент получает исходные данные для проектирования: тип лопаточной машины (центробежный компрессор, радиальная турбина, осевая турбина), требуемые параметры (расход, степень повышения/понижения давления, частота вращения). На основе анализа выбирается конструктивная схема, тип ротора и статора, способ крепления лопаток.
2. **Газодинамический расчёт проточной части.** Выполняется газодинамический расчёт в соответствии с выбранным типом лопаточной машины. Определяются основные геометрические параметры проточной части: диаметры, ширина каналов, углы лопаток. Строятся треугольники скоростей.
3. **Создание 3D-модели рабочего колеса.** В CAD-системе создаётся параметрическая 3D-модель рабочего колеса (компрессора или турбины) со всеми конструктивными элементами. При создании модели используются результаты газодинамического расчёта.
4. **Подготовка отчёта.** Выполняется пояснительная записка, в которой описываются результаты газодинамического расчёта, обосновывается выбор конструктивных решений, приводятся расчётные формулы, таблицы результатов, эскизы проточной части.

Требования к оформлению:

Индивидуальное задание выполняется в форме раздела пояснительной записки к курсовому проекту, включающего:

- описание исходных данных;
- выбор конструктивной схемы;
- газодинамический расчёт;
- результаты расчёта в табличной форме;
- эскизы проточной части и треугольников скоростей;
- описание созданной 3D-модели рабочего колеса.

Примерные темы индивидуальных заданий (в рамках курсового проекта):

1. Газодинамический расчёт и 3D-моделирование рабочего колеса центробежного компрессора для турбокомпрессора дизельного двигателя мощностью 150 кВт.
2. Газодинамический расчёт и 3D-моделирование рабочего колеса радиальной турбины для турбокомпрессора бензинового двигателя с рабочим объёмом 2,0 л.
3. Газодинамический расчёт и 3D-моделирование рабочего колеса осевой турбины для малоразмерного ГТД мощностью 50 кВт.
4. Газодинамический расчёт и 3D-моделирование рабочего колеса центробежного компрессора с загнутыми назад лопатками.
5. Газодинамический расчёт и 3D-моделирование соплового аппарата осевой турбины для малоразмерного ГТД.
6. Газодинамический расчёт и 3D-моделирование диффузора центробежного компрессора.

Оценочные средства для практических занятий

Типовые задания для практических занятий

Модуль 1. Проектирование проточной части. Профилирование лопаток. Прочностной расчёт

Задание 1. Компоновка ротора и статора лопаточной машины. Выбор конструктивной схемы

По заданным параметрам (тип машины, частота вращения, степень повышения/понижения давления, массогабаритные ограничения) выбрать конструктивную схему (одновальная, двухвальная; тип ротора; способ крепления лопаток). Обосновать выбор. Выполнить эскиз компоновки.

Задание 2. Газодинамический расчет ступени центробежного компрессора (определение основных размеров)

По заданным исходным данным (расход воздуха G, давление и температура на входе p1, T1, частота вращения n, степень повышения давления πк) выполнить газодинамический расчёт центробежного компрессора. Определить окружную скорость на выходе, работу, степень повышения давления, входной и выходной диаметры рабочего колеса, ширину каналов, углы лопаток. Построить треугольники скоростей.

Задание 3. Газодинамический расчет ступени осевого компрессора (определение основных размеров)

По заданным исходным данным (расход воздуха G, давление и температура на входе p1, T1, частота вращения n, средний диаметр Dcp, степень повышения давления ступени) выполнить газодинамический расчёт ступени осевого компрессора. Определить осевую скорость, окружную скорость, построить треугольники скоростей, рассчитать работу, степень реактивности, углы установки лопаток.

Задание 4. Газодинамический расчет ступени радиальной турбины (определение основных размеров)

По заданным исходным данным (расход газа G, давление и температура на входе p1, T1, частота вращения n, степень понижения давления πт) выполнить газодинамический расчёт радиальной турбины. Определить окружную скорость на входе, работу, степень понижения

давления, входной и выходной диаметры рабочего колеса, ширину каналов, углы лопаток. Построить треугольники скоростей.

Задание 5. Газодинамический расчет ступени осевой турбины (определение основных размеров)

По заданным исходным данным (расход газа G, давление и температура на входе p1, T1, частота вращения n, средний диаметр Dcp, степень понижения давления) выполнить газодинамический расчёт ступени осевой турбины. Определить осевую скорость, окружную скорость, построить треугольники скоростей, рассчитать работу, степень реактивности, углы установки лопаток соплового аппарата и рабочего колеса.

Задание 6. Построение профиля лопатки компрессора в CAD-системе

По заданным параметрам профиля (координаты спинки и корыта, хорда, угол установки) построить профиль лопатки компрессора в CAD-системе. Создать 3D-модель лопатки с учётом переменного профиля по высоте. Выполнить аэродинамический анализ полученного профиля (определение подъёмной силы, сопротивления).

Задание 7. Построение профиля лопатки турбины в CAD-системе

По заданным параметрам профиля построить профиль лопатки турбины в CAD-системе. Создать 3D-модель лопатки. Учесть конструктивные особенности (наличие полости охлаждения, выходных отверстий).

Задание 8. Создание 3D-модели рабочего колеса центробежного компрессора

По результатам газодинамического расчёта создать 3D-модель рабочего колеса центробежного компрессора в CAD-системе. Выполнить моделирование лопаток с переменным углом по высоте. Создать сборку рабочего колеса с валом.

Задание 9. Прочностной расчет лопатки (центробежные силы, напряжения)

По заданным параметрам (материал, геометрия лопатки, частота вращения) выполнить прочностной расчёт лопатки: определить центробежную силу, напряжения в корневом сечении. Оценить запас прочности.

Задание 10. Прочностной расчет диска компрессора (в CAE-системе)

По заданной 3D-модели диска компрессора выполнить прочностной анализ в CAE-системе. Задать граничные условия (центробежные силы, нагрузки от лопаток). Определить поля напряжений и деформаций. Оценить запас прочности.

Задание 11. Определение собственных частот колебаний лопатки

По заданной 3D-модели лопатки выполнить модальный анализ в CAE-системе. Определить первые несколько собственных частот колебаний. Оценить возможность резонанса с частотами возмущающих сил.

Модуль 2. Конструкция узлов. Материалы и технологии. Сборка и испытания. Курсовой проект

Задание 12. Выбор и расчет подшипников скольжения для ротора турбокомпрессора

По заданным параметрам (нагрузка, частота вращения, диаметр вала) выбрать тип подшипника скольжения (плавающие вкладыши, подшипник качения). Выполнить проверочный расчёт подшипника скольжения на жидкостное трение (определить минимальную толщину масляного слоя, температуру масла).

Задание 13. Расчет лабиринтного уплотнения (определение утечек)

По заданным параметрам (диаметр вала, радиальный зазор, количество гребней, давление и температура газа) рассчитать утечки через лабиринтное уплотнение. Оценить влияние конструкции уплотнения на величину утечек.

Задание 14. Выбор материалов для деталей турбокомпрессора

По заданным условиям работы деталей турбокомпрессора (рабочее колесо компрессора, лопатка турбины, вал, корпус) обосновать выбор материалов. Указать марки сплавов, их свойства, требования к термообработке и покрытиям.

Задание 15. Разработка технологической схемы сборки ротора

Для заданной конструкции ротора турбокомпрессора разработать технологическую схему сборки. Определить последовательность операций, необходимые приспособления, методы контроля. Оформить схему сборки.

Задание 16. Комплексное конструирование узла (рабочее колесо + вал)

По результатам газодинамического и прочностного расчётов выполнить конструктивную проработку узла «рабочее колесо — вал». Выбрать способ соединения (наплавка, шлицевое соединение, прессовая посадка). Выполнить 3D-модель узла в сборе. Разработать рабочие чертежи деталей.

Оценочные средства для курсового проекта

Курсовой проект выполняется в 7-м семестре и является завершающим этапом сквозного проекта в области турбомашин. Курсовой проект направлен на комплексное применение навыков газодинамического расчёта, прочностного анализа, 3D-моделирования и оформления конструкторской документации для создания полностью спроектированной лопаточной машины.

Цель курсового проекта: разработка полного комплекта конструкторской документации на лопаточную машину (центробежный компрессор для турбокомпрессора, радиальную турбину, осевую турбину или узел турбокомпрессора) с выполнением газодинамического и прочностного обоснования.

Примерные темы курсовых проектов:

1. Проектирование центробежного компрессора для турбокомпрессора дизельного двигателя мощностью 150 кВт.
2. Проектирование радиальной турбины для турбокомпрессора бензинового двигателя с рабочим объёмом 2,0 л.
3. Проектирование осевой турбины для малоразмерного газотурбинного двигателя мощностью 50 кВт.
4. Проектирование одноступенчатого центробежного компрессора для наддува двигателя мощностью 120 кВт.
5. Проектирование радиальной турбины с изменяемой геометрией (VGT) для турбокомпрессора.
6. Проектирование осевого компрессора для вспомогательной силовой установки (ВСУ).
7. Проектирование турбокомпрессора (компрессор + турбина) для дизельного двигателя мощностью 200 кВт.
8. Разработка конструкции и прочностной расчет рабочего колеса центробежного компрессора.
9. Разработка конструкции и газодинамический расчет ступени осевой турбины.
10. Комплексное проектирование узла «рабочее колесо — вал — подшипниковый узел» для турбокомпрессора.

Структура курсового проекта:

- **Пояснительная записка** (объем 25-30 страниц) включает:
  - титульный лист с указанием темы проекта, ФИО студента, группы, руководителя;
  - задание на курсовой проект;
  - содержание;
  - введение (актуальность, цель и задачи работы);
  - выбор и обоснование исходных данных (тип двигателя, параметры наддува, расход воздуха);
  - газодинамический расчет (определение основных размеров проточной части, треугольников скоростей, КПД);
  - конструктивную разработку (описание конструкции, обоснование выбора материалов, выбор конструктивных решений);

- прочностной расчет (определение напряжений в рабочем колесе, диске, лопатках; оценка запасов прочности; результаты модального анализа);
- расчет подшипникового узла и уплотнений (выбор типа, проверка работоспособности);
- заключение с выводами по работе;
- список использованной литературы;
- приложения (при необходимости).

- **Графическая часть** (3-4 листа формата А2 или А1) включает:
- сборочный чертеж турбокомпрессора (или его узла);
- рабочие чертежи 2-3 оригинальных деталей (рабочее колесо компрессора, вал, корпус, лопатка турбины и др.);
- спецификацию к сборочному чертежу;
- 3D-модели в электронном виде (на электронном носителе).

Требования к оформлению:

Все чертежи выполняются в CAD-системе (КОМПАС-3D, SolidWorks, NX) с соблюдением требований ЕСКД. Пояснительная записка оформляется в соответствии с ГОСТ 2.105-95 (текстовые документы) и ГОСТ 7.32-2017 (отчет о НИР). На защиту курсового проекта представляется презентация (5-7 слайдов) с основными результатами.

Оценочные средства для лабораторных занятий

Лабораторные занятия по дисциплине не предусмотрены учебным планом.

- **Промежуточная аттестация (экзамен)**

Условия допуска к экзамену

Студент допускается к сдаче экзамена 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 курсового проекта с оценкой не ниже «удовлетворительно».
- Отсутствие академической задолженности по дисциплине.

Структура экзаменационного билета

Экзаменационный билет состоит из двух теоретических вопросов (по одному из каждого модуля) и одного практического задания (расчётная задача или анализ конструктивного решения).

Структура билета:

- **Вопрос 1** (Модуль 1): Проектирование проточной части, профилирование лопаток, прочностной расчёт.
- **Вопрос 2** (Модуль 2): Конструкция подшипниковых узлов и уплотнений, материалы и технологии, сборка и испытания.
- **Задание 3**: Расчётная задача (газодинамический расчёт, прочностной расчёт) или анализ конструктивного решения.

Типовые экзаменационные билеты

Экзаменационный билет №1

Вопрос 1 (Модуль 1)

Газодинамический расчёт центробежного компрессора. Определение основных геометрических параметров рабочего колеса. Построение треугольников скоростей. Влияние угла лопаток на выходе на характеристики компрессора.

Вопрос 2 (Модуль 2)

Конструкция подшипникового узла турбокомпрессора. Подшипники скольжения (плавающие вкладыши): конструкция, принцип работы, система смазки и охлаждения. Расчет подшипников скольжения на жидкостное трение.

Задание 3

Для центробежного компрессора заданы: расход воздуха G = 0,5 кг/с, давление и температура на входе p1 = 0,1 МПа, T1 = 288 К, частота вращения n = 60000 об/мин, требуемая степень повышения давления πк = 2,2. Выполнить газодинамический расчёт: определить окружную скорость на выходе u2, работу компрессора L, выходной диаметр рабочего колеса D2. Построить треугольники скоростей на выходе, приняв угол лопаток β2л = 45°.

Экзаменационный билет №2

Вопрос 1 (Модуль 1)

Прочностной расчёт лопатки центробежного компрессора. Определение центробежных сил, напряжений в корневом сечении. Оценка запаса прочности. Учёт газодинамических нагрузок и температурных напряжений.

Вопрос 2 (Модуль 2)

Уплотнения вала турбокомпрессора. Лабиринтные уплотнения: конструкция, принцип работы, расчёт утечек. Концевые уплотнения. Влияние уплотнений на эффективность турбокомпрессора.

Задание 3

Для радиальной турбины заданы: расход газа G = 0,48 кг/с, давление и температура на входе p1 = 0,3 МПа, T1 = 800 К, давление на выходе p2 = 0,1 МПа, частота вращения n = 55000 об/мин, средний диаметр на входе D1ср = 0,12 м. Выполнить газодинамический расчёт: определить окружную скорость на входе u1, работу турбины L, степень понижения давления πт. Построить треугольники скоростей на входе, приняв вход без закрутки (c1u = 0).

Экзаменационный билет №3

Вопрос 1 (Модуль 1)

Профилирование лопаток осевой турбины. Методы построения профилей. Аэродинамические профили (NACA, ЦАГИ). Построение решетки профилей. Параметрическое моделирование лопатки в CAD-системе. Учёт охлаждения лопаток.

Вопрос 2 (Модуль 2)

Материалы для лопаточных машин. Жаропрочные никелевые сплавы для лопаток турбины: состав, свойства, применение. Технологии изготовления лопаток (точное литьё по выплавляемым моделям). Защитные покрытия.

Задание 3

Для лопатки центробежного компрессора заданы: площадь корневого сечения A = 50 мм², плотность материала ρ = 7800 кг/м³, радиус расположения корневого сечения Rк = 0,03 м, радиус расположения центра масс лопатки Rцм = 0,045 м, частота вращения n = 60000 об/мин. Определить центробежную силу, действующую на лопатку, и напряжение в корневом сечении. Оценить запас прочности, если предел прочности материала σв = 800 МПа.

Полный перечень теоретических вопросов к экзамену по каждой теме

Модуль 1. Проектирование проточной части. Профилирование лопаток. Прочностной расчёт

1. Роль дисциплины в сквозном проекте. Этапы проектирования лопаточной машины.
2. Компоновка ротора и статора лопаточной машины. Выбор конструктивной схемы. Осевые и радиальные зазоры.
3. Выбор типа компрессора (осевой, центробежный, комбинированный). Факторы, влияющие на выбор.
4. Газодинамический расчет ступени центробежного компрессора: определение диаметров, ширин каналов, углов лопаток.
5. Расчет геометрии рабочего колеса центробежного компрессора. Особенности проектирования для турбокомпрессоров.

6. Расчет диффузора и улитки центробежного компрессора.

7. Выбор типа турбины (осевая, радиальная). Факторы, влияющие на выбор.

8. Газодинамический расчет ступени радиальной турбины: определение диаметров, углов лопаток, высоты каналов.

9. Газодинамический расчет ступени осевой турбины: определение параметров соплового аппарата и рабочего колеса.

10. Согласование параметров турбины с компрессором в турбокомпрессоре.

11. Методы построения профилей лопаток. Профилирование по дугам окружностей. Использование аэродинамических профилей.

12. Построение решетки профилей. Параметрическое моделирование лопатки в CAD-системе.

13. Профилирование лопаток центробежного компрессора и радиальной турбины.

14. Профилирование лопаток осевой турбины с охлаждением. Учет технологических требований.

15. Расчет лопаток на статическую и циклическую прочность. Определение центробежных сил, газодинамических нагрузок.

16. Расчет лопаток на собственные частоты колебаний. Избежание резонанса.

17. Расчет дисков компрессора и турбины на прочность (методом конечных элементов).

18. Расчет замковых соединений (ёлочный, Т-образный). Расчет валов на кручение и изгиб.

19. Определение запасов прочности. Использование CAE-систем для прочностного анализа.

Модуль 2. Конструкция узлов. Материалы и технологии. Сборка и испытания. Курсовой проект

20. Выбор типа подшипников для ротора лопаточной машины. Подшипники скольжения (плавающие вкладыши) и подшипники качения.

21. Особенности работы подшипников при высоких скоростях и температурах. Расчет подшипников скольжения на жидкостное трение.

22. Расчет подшипников качения на долговечность. Система смазки подшипникового узла.

23. Уплотнения вала: лабиринтные, концевые, с плавающими кольцами. Расчет утечек через уплотнения.

24. Конструктивные схемы расположения подшипников (с опорами между колесами, с выносными опорами).

25. Выбор материалов для деталей лопаточной машины в зависимости от условий работы.

26. Жаропрочные никелевые и кобальтовые сплавы для лопаток турбины и дисков.

27. Титан и титановые сплавы для лопаток компрессора. Высокопрочные стали для валов.

28. Технологии изготовления: точное литьё по выплавляемым моделям (лопатки), штамповка, механическая обработка на станках с ЧПУ.

29. Обработка лопаток: фрезерование, шлифование. Защитные и упрочняющие покрытия.

30. Технология сборки ротора лопаточной машины. Балансировка ротора (статическая, динамическая).

31. Сборка статора. Контроль осевых и радиальных зазоров.

32. Испытания лопаточной машины: снятие характеристик (расход, степень повышения давления, КПД). Виброиспытания.

33. Испытания на ресурс. Диагностика неисправностей. Оформление эксплуатационной документации.

34. Структура и содержание курсового проекта. Требования к пояснительной записке и графической части.

35. Состав графической части курсового проекта. Особенности выполнения 3D-моделей.

Примеры практических заданий для экзамена

Пример 1. Газодинамический расчёт центробежного компрессора

Для центробежного компрессора заданы:

- расход воздуха G = 0,5 кг/с;
- давление на входе p1 = 0,1 МПа;
- температура на входе T1 = 288 К;
- частота вращения n = 60000 об/мин;
- степень повышения давления $\pi_к$ = 2,2;
- КПД компрессора $\eta_к$ = 0,78.

Требуется:

1. Определить работу компрессора L.
2. Определить температуру воздуха на выходе из компрессора T2.
3. Определить окружную скорость на выходе из рабочего колеса u2, приняв, что коэффициент напора ψ = 0,55.
4. Определить выходной диаметр рабочего колеса D2.
5. Построить треугольник скоростей на выходе, приняв угол лопаток $\beta_{2л}$ = 45°.

Пример 2. Газодинамический расчёт радиальной турбины

Для радиальной турбины заданы:

- расход газа G = 0,48 кг/с;
- давление на входе p1 = 0,3 МПа;
- температура на входе T1 = 800 К;
- давление на выходе p2 = 0,1 МПа;
- частота вращения n = 55000 об/мин;
- средний диаметр на входе D1ср = 0,12 м;
- КПД турбины $\eta_т$ = 0,82.

Требуется:

1. Определить работу турбины L.
2. Определить температуру газа на выходе из турбины T2.
3. Определить окружную скорость на входе u1.
4. Построить треугольник скоростей на входе, приняв вход без закрутки (c_{1u} = 0).
5. Определить угол выхода потока из соплового аппарата α_1, если осевая составляющая скорости c_{1a} = 180 м/с.

Пример 3. Прочностной расчёт лопатки

Для лопатки центробежного компрессора заданы:

- площадь корневого сечения A = 50 мм²;
- плотность материала ρ = 7800 кг/м³;
- радиус расположения корневого сечения $R_к$ = 0,03 м;
- радиус расположения центра масс лопатки $R_{цм}$ = 0,045 м;
- частота вращения n = 60000 об/мин;
- предел прочности материала $\sigma_в$ = 800 МПа.

Требуется:

1. Определить центробежную силу, действующую на лопатку.
2. Определить напряжение в корневом сечении.

3. Оценить запас прочности.
4. Сделать вывод о достаточности прочности.

Пример 4. Анализ конструктивной схемы турбокомпрессора

По представленному разрезу турбокомпрессора (рисунок или 3D-модель) определить:

- тип компрессора (центробежный, осевой);
- тип турбины (радиальная, осевая);
- тип подшипникового узла (подшипники скольжения, подшипники качения);
- тип уплотнений (лабиринтные, концевые);
- способ охлаждения турбины.
- Обосновать свой ответ, указав характерные конструктивные признаки.

Пример 5. Выбор материалов для деталей турбокомпрессора

Для следующих деталей турбокомпрессора обосновать выбор материала:

- рабочее колесо компрессора (условия работы: температура до 250°C, центробежные нагрузки);
- рабочее колесо турбины (условия работы: температура до 950°C, центробежные нагрузки, агрессивная среда);
- вал турбокомпрессора (условия работы: переменные нагрузки, высокие частоты вращения, работа в подшипниках скольжения);
- корпус компрессора (условия работы: давление до 0,3 МПа, температура до 150°C).

Указать марки сплавов, их основные свойства, требования к термообработке и покрытиям.