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

ТЕОРИЯ ЛОПАТОЧНЫХ МАШИН

Направление подготовки/ специальность
13.03.03 «Энергетическое машиностроение»

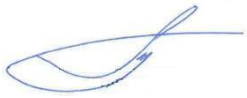
Профиль/ специализация
Поршневые двигатели и турбомашины

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 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 фундаментальных теоретических знаний и практических навыков в области термогазодинамических процессов, протекающих в лопаточных машинах (компрессорах и турбинах), а также освоение методов их расчётного анализа, необходимых для выполнения газодинамического расчёта и обоснования проектных параметров проточной части на втором этапе сквозного проектирования «Расчётное обоснование, верификация и оптимизация».

Задачами дисциплины являются:

В части теоретической подготовки:

-- изучение основных понятий, классификации и принципов действия лопаточных машин (осевых и центробежных компрессоров, осевых и радиальных турбин);

-- освоение теории идеальной ступени лопаточной машины: вывод и анализ уравнения Эйлера, треугольники скоростей, понятие степени реактивности;

-- формирование знаний о решётках профилей, их геометрических и газодинамических характеристиках, законах профилирования;

-- изучение структуры потерь энергии в лопаточных машинах и методов оценки их КПД;

-- анализ характеристик лопаточных машин (напорных, расходных, КПД) и факторов, влияющих на их форму при работе на различных режимах;

-- изучение основ подобия и методов моделирования рабочих процессов в лопаточных машинах.

В части формирования практических навыков:

-- формирование навыков построения треугольников скоростей для различных типов ступеней компрессоров и турбин;

-- освоение методик газодинамического расчёта ступени осевого компрессора и осевой турбины;

-- приобретение навыков расчёта параметров ступени центробежного компрессора и радиальной турбины;

-- формирование умений анализировать влияние конструктивных и режимных параметров на эффективность работы лопаточной машины.

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
ОПК-5. Способен использовать свойства конструкционных и электротехнических материалов в расчетах параметров и режимов объектов профессиональной деятельности	**ИОПК-5.1.** Умеет использовать свойства конструкционных и электротехнических материалов в расчетах параметров и режимов при разработке, проектировании и испытаниях энергетических установок **ИОПК-5.1.** Умеет рассчитывать элементы и параметры энергетических машин и установок с учётом свойств конструкционных материалов

Обоснование выбора общепрофессиональной компетенции ОПК-5:

Выбор компетенции **ОПК-5** обусловлен тем, что «Теория лопаточных машин» формирует фундаментальные знания о рабочих процессах и методах расчёта параметров лопаточных машин. Выбор материалов (жаропрочных, коррозионно-стойких, высокопрочных) для лопаток, дисков и корпусов компрессоров и турбин напрямую зависит от термогазодинамических параметров (температуры, давления, скоростей потока, возникающих напряжений), которые определяются в

рамках данной дисциплины. Таким образом, теория лопаточных машин создаёт основу для обоснованного использования свойств материалов на этапе конструирования.

Дисциплина Б1.1.24 является **базовой для формирования индикаторов ИОПК-5.1**, поскольку без понимания газодинамических процессов и нагрузок невозможно корректно применять знания о свойствах материалов при расчёте и проектировании лопаточных машин.

Планируемые результаты обучения по дисциплине

Код и наименование компетенции	Код и наименование индикатора достижения компетенции
ОПК-5. Способен использовать свойства конструкционных и электротехнических материалов в расчетах параметров и режимов объектов профессиональной деятельности	**ИОПК-5.1.** Умеет использовать свойства конструкционных и электротехнических материалов в расчетах параметров и режимов при разработке, проектировании и испытаниях энергетических установок
	ИОПК-5.1. (второй) Умеет рассчитывать элементы и параметры энергетических машин и установок с учетом свойств конструкционных материалов

Роль дисциплины в формировании компетенций:

Формирующая. Дисциплина обеспечивает знания о принципах действия, конструктивных особенностях и методах расчёта лопаточных машин: компрессоров (центробежных, осевых) и турбин (радиальных, осевых). Студенты изучают треугольники скоростей, уравнения Эйлера для компрессора и турбины, характеристики лопаточных машин, а также методы расчёта напряжённо-деформированного состояния лопаток. В ходе выполнения расчётных заданий формируются навыки учёта свойств конструкционных материалов (жаропрочных сплавов, титановых сплавов, композиционных материалов) при определении прочностных характеристик лопаток, выборе материала для рабочего колеса и корпусных деталей, а также при оценке теплового состояния и усталостной долговечности элементов лопаточных машин (ИОПК-5.1).

2. Место дисциплины в структуре образовательной программы

Дисциплина **«Теория лопаточных машин»** относится к **обязательной части блока Б.1** учебного плана (код дисциплины: Б1.1.24) и изучается в **6-м семестре**.

Данная дисциплина является **фундаментальной для второго этапа сквозного проекта «Расчётное обоснование, верификация и оптимизация»** в области турбомашин. Она обеспечивает освоение методов газодинамического расчёта, результаты которого становятся исходными данными для проектирования проточной части компрессоров и турбин на последующих этапах.

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 механики жидкости и газа необходимо для понимания уравнений, описывающих течение в лопаточных машинах.
- **Математика** (школьный курс, а также дисциплины Б1.1.26.1 «Линейная алгебра», 1 семестр, и Б1.1.26.2 «Математический анализ», 2 семестр): владение векторной алгеброй, дифференциальным и интегральным исчислением необходимо для вывода и анализа уравнений газовой динамики и построения треугольников скоростей.

- **Термодинамика** (Б1.1.17, 3 семестр): знание законов термодинамики, свойств рабочих тел, процессов сжатия и расширения является основой для анализа рабочих процессов в лопаточных машинах.
- **Конструкция газотурбинных двигателей транспортного и энергетического назначения** (Б1.2.3, 4 семестр): знание конструктивных схем и устройства компрессоров и турбин позволяет понимать, как геометрические параметры связаны с газодинамическими процессами.
- **Вычислительная гидрогазодинамика в проектировании и верификации двигателей** (Б1.1.19, 4-5 семестры): знание основ гидрогазодинамики течений в каналах и оснований численного моделирования необходимо для понимания более сложных методов расчёта, которые дополняют аналитические подходы, изучаемые в данной дисциплине.

Основные положения дисциплины используются в дальнейшем при изучении следующих дисциплин и освоении элементов образовательной программы, обеспечивая последующие этапы сквозного проекта:

- **Агрегаты наддува** (Б1.2.7, 6 семестр): непосредственно базируется на теории лопаточных машин для выполнения газодинамического расчёта и анализа характеристик турбокомпрессоров (III этап).
- **Конструирование лопаточных машин** (Б1.2.13, 7 семестр): использует результаты газодинамического расчёта (геометрию лопаток, профили, углы) в качестве исходных данных для конструирования, прочностных расчётов и оформления конструкторской документации (III и IV этапы).
- **Камеры сгорания газотурбинных двигателей** (Б1.2.12, 7 семестр): требует понимания газодинамических процессов, изучаемых в данной дисциплине, для расчёта аэродинамики и смесеобразования в камере сгорания.
- **Расчет и оптимизация деталей двигателя** (Б1.2.9, 6 семестр): результаты газодинамического анализа используются как граничные условия для теплового и прочностного анализа лопаток и дисков турбомашин в CAE-системах (III этап).
- **Методы испытаний поршневых двигателей и турбомашин** (Б1.2.14, 7 семестр): расчётные характеристики лопаточных машин, полученные в рамках данной дисциплины, верифицируются экспериментально (IV этап).
- Все последующие дисциплины, связанные с проектированием, расчётом и доводкой турбомашин, а также подготовка и защита выпускной квалификационной работы

3. Структура и содержание дисциплины

Общая трудоемкость дисциплины составляет **4 зачетные единицы (144 часа)**.

3.1 Виды учебной работы и трудоемкость

№ п/п	Вид учебной работы	Количество часов	Семестры
			6
1	Аудиторные занятия	72	72
	В том числе:		
1.1	Лекции	36	36
1.2	Семинарские/практические занятия	36	36

№ п/п	Вид учебной работы	Количество часов	Семестры
1.3	Лабораторные занятия	—	—
2	Самостоятельная работа	72	72
3	Промежуточная аттестация		
	Зачет/диф.зачет/экзамен	Экзамен	Экзамен
	Итого	**144**	**144**

3.2 Тематический план изучения дисциплины

№ п/п	Название раздела / темы	Всего часов	Аудиторная работа	Лекции	Семинарские/ практические занятия	Лабораторные занятия	Самостоятельная работа
Семестр 6	**Теория лопаточных машин**						
1	Тема 1. Введение. Основные понятия и классификация	10	4	2	2	—	6
2	Тема 2. Основы газовой динамики лопаточных машин	16	8	4	4	—	8
3	Тема 3. Решетки профилей	16	8	4	4	—	8
4	Тема 4. Теория осевого компрессора	20	10	4	6	—	10
5	Тема 5. Теория центробежного компрессора	18	10	4	6	—	8
6	Тема 6. Теория осевой турбины	20	10	4	6	—	10

№ п/п	Название раздела / темы	Всего часов	Аудиторная работа	Лекции	Семинарские/ практические занятия	Лабораторные занятия	Самостоятельная работа
7	Тема 7. Теория радиальной турбины	14	8	4	2	—	8
8	Тема 8. Характеристики лопаточных машин	14	8	2	6	—	6
9	Тема 9. Подобие и моделирование в лопаточных машинах	12	6	4	2	—	6
10	Подготовка к экзамену	4	—	—	—	—	4
	Итого за 1 семестр	**144**	**72**	**36**	36	—	**72**

3.3 Содержание дисциплины

Семестр 6. Теория лопаточных машин

Тема 1. Введение. Основные понятия и классификация

Предмет и задачи теории лопаточных машин. Место дисциплины в сквозном проекте: газодинамический расчет проточной части проектируемой турбомашины. Классификация лопаточных машин: по направлению потока (осевые, радиальные, диагональные), по назначению (компрессоры, турбины), по типу рабочего процесса (активные, реактивные). Основные параметры лопаточных машин: расход, работа, мощность, КПД. Треугольники скоростей. Основные этапы проектирования лопаточных машин: газодинамический расчет, конструктивная проработка, прочностной расчет.

Тема 2. Основы газовой динамики лопаточных машин

Уравнение неразрывности потока. Уравнение количества движения (Эйлера). Уравнение энергии (первый закон термодинамики для потока). Уравнение Эйлера для лопаточных машин (основное уравнение). Физический смысл и вывод. Теоретический напор (работа) ступени. Степень реактивности. Влияние степени реактивности на треугольники скоростей. Понятие о циркуляции скорости. Анализ энергетического баланса ступени.

Тема 3. Решетки профилей

Геометрические характеристики решетки профилей: хорда, шаг, угол установки, угол входа и выхода потока, густота решетки. Аэродинамические характеристики решетки профилей: коэффициент подъемной силы, коэффициент лобового сопротивления, поляра профиля. Уравнение Н.Е. Жуковского для подъемной силы. Потери в решетках профилей: профильные, концевые, вторичные. Влияние числа Маха и числа Рейнольдса на характеристики решетки. Методы снижения потерь.

Тема 4. Теория осевого компрессора

Принцип действия осевого компрессора. Треугольники скоростей на входе и выходе из рабочего колеса. Степень повышения давления ступени. Работа ступени. КПД ступени. Потери в ступени осевого компрессора. Влияние углов атаки и перегрузки. Характеристики ступени осевого компрессора: зависимость степени повышения давления и КПД от расхода. Помпаж осевого компрессора: причины, признаки, последствия, способы предотвращения. Многоступенчатый осевой компрессор: особенности расчета и согласования ступеней. Методы регулирования.

Тема 5. Теория центробежного компрессора

Принцип действия центробежного компрессора. Треугольники скоростей на входе и выходе из рабочего колеса. Работа компрессора. Степень повышения давления. Эффективность диффузора. Потери в центробежном компрессоре: потери на трение, на вихреобразование, на утечки. Характеристики центробежного компрессора: напорная характеристика, линия рабочих режимов, граница помпажа. Влияние геометрических параметров (угла лопаток, формы диффузора) на характеристики. Особенности расчета рабочего колеса с радиальными и загнутыми назад лопатками.

Тема 6. Теория осевой турбины

Принцип действия осевой турбины. Треугольники скоростей на входе и выходе из рабочего колеса. Работа турбины. Степень понижения давления. Степень реактивности осевой турбины. КПД осевой турбины. Потери в осевой турбине: профильные, концевые, на утечки. Влияние числа Маха на характеристики турбины. Особенности работы осевой турбины при переменных режимах. Регулирование турбины (изменяемая геометрия соплового аппарата). Системы охлаждения лопаток осевой турбины.

Тема 7. Теория радиальной (центростремительной) турбины

Принцип действия радиальной турбины. Треугольники скоростей. Работа турбины. Степень реактивности. Сравнение радиальной и осевой турбин: преимущества и недостатки, области применения. Потери в радиальной турбине. Особенности расчета и проектирования радиальных турбин для турбокомпрессоров и малоразмерных ГТД. Конструктивные схемы радиальных турбин (с литым колесом, с припаянными лопатками).

Тема 8. Характеристики лопаточных машин

Понятие характеристики лопаточной машины. Приведенные характеристики компрессоров и турбин. Влияние частоты вращения на характеристики. Универсальные характеристики. Понятие о линии рабочих режимов (working line). Совместная работа компрессора и турбины в турбокомпрессоре. Анализ устойчивости работы. Методы построения и анализа характеристик по экспериментальным данным.

Тема 9. Подобие и моделирование в лопаточных машинах

Критерии подобия в лопаточных машинах: число Маха (M), число Рейнольдса (Re), коэффициент расхода (φ), коэффициент напора (ψ). Методы пересчета характеристик при изменении размеров, частоты вращения, параметров газа. Моделирование проточных частей. Использование критериев подобия при проектировании и доводке лопаточных машин. Геометрическое подобие и его границы применимости.

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	Построение треугольников скоростей для ступени компрессора	4

№ п/п	№ раздела дисциплины	Наименование практического занятия	Трудоемкость (час.)
2	Тема 2	Расчёт работы и степени реактивности по треугольникам скоростей	2
3	Тема 3	Расчёт аэродинамических характеристик решетки профилей (подъемная сила, сопротивление)	2
4	Тема 4	Газодинамический расчет ступени осевого компрессора	4
5	Тема 4	Построение характеристики ступени осевого компрессора	2
6	Тема 5	Газодинамический расчет ступени центробежного компрессора	4
7	Тема 6	Газодинамический расчет ступени осевой турбины	4
8	Тема 6	Построение характеристики осевой турбины	2
9	Тема 7	Газодинамический расчет радиальной турбины	2
10	Тема 8	Построение и анализ характеристики центробежного компрессора (по заданным данным)	2
11	Тема 8	Построение линии совместной работы компрессора и турбины	2
12	Тема 9	Пересчет характеристик компрессора по критериям подобия	2
13	Тема 4-7	Комплексный расчет ступени турбокомпрессора (компрессор + турбина)	4
	Итого		**36**

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 (навыки газодинамического расчета) используются при выполнении

курсового проекта по дисциплине **«Конструирование лопаточных машин»** (Б1.2.13) для определения геометрических параметров проточной части, а также в выпускной квалификационной работе.

.

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

Теория и расчет лопаточных машин
https://online.mospolytech.ru/course/view.php?id=9380

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.
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

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 «Теория лопаточных машин» является формирующей для компетенции ОПК-5, обеспечивая фундаментальные теоретические знания и практические навыки в области термогазодинамических процессов, протекающих в лопаточных машинах (компрессорах и турбинах), а также освоение методов их расчётного анализа, необходимых для выполнения газодинамического расчёта и обоснования проектных параметров проточной части на третьем этапе сквозного проектирования «Расчётное обоснование, верификация и оптимизация».

В процессе изучения дисциплины оценивается сформированность следующих компетенций и индикаторов:

ОПК-5. Способен использовать свойства конструкционных и электротехнических материалов в расчетах параметров и режимов объектов профессиональной деятельности

Индикаторы достижения компетенции:

- **ИОПК-5.1.** Умеет использовать свойства конструкционных и электротехнических материалов в расчетах параметров и режимов при разработке, проектировании и испытаниях энергетических установок.
- **ИОПК-5.1.** Умеет рассчитывать элементы и параметры энергетических машин и установок с учётом свойств конструкционных материалов.

Дисциплина «Теория лопаточных машин» формирует фундаментальные знания о рабочих процессах и методах расчёта параметров лопаточных машин. Выбор материалов (жаропрочных, коррозионно-стойких, высокопрочных) для лопаток, дисков и корпусов компрессоров и турбин напрямую зависит от термогазодинамических параметров (температуры, давления, скоростей потока, возникающих напряжений), которые определяются в рамках данной дисциплины. Таким образом, теория лопаточных машин создаёт основу для обоснованного использования свойств материалов на этапе конструирования. В ходе изучения дисциплины студент осваивает основные понятия и классификацию лопаточных машин, основы газовой динамики, теорию решёток профилей, методы газодинамического расчёта ступеней осевых и центробежных компрессоров, осевых и радиальных турбин, анализ характеристик лопаточных машин, а также основы подобия и моделирования.

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 основных понятий теории лопаточных машин, методов построения треугольников скоростей, расчёта работы и КПД ступени, характеристик решёток профилей, газодинамического расчёта

ступеней компрессоров и турбин, а также умения анализировать характеристики лопаточных машин и применять критерии подобия. Результаты тестирования используются для оценки уровня освоения материала модуля и определения готовности студента к дальнейшему обучению. Проверяемые индикаторы: ИОПК-5.1 (знание методов расчёта параметров лопаточных машин для последующего обоснованного выбора материалов и расчёта элементов с учётом свойств материалов).

Устный опрос (собеседование)

Проводится в ходе практических занятий для проверки понимания студентом теоретического материала, способности аргументированно излагать принципы работы лопаточных машин, методы газодинамического расчёта, анализировать треугольники скоростей, обосновывать выбор конструктивных параметров ступени. 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 газодинамический расчёт проточной части проектируемой турбомашины. Проверяемые индикаторы: ИОПК-5.1.

Практические занятия

В ходе выполнения практических заданий (построение треугольников скоростей, расчёт работы и степени реактивности, газодинамический расчёт ступеней компрессора и турбины, построение и анализ характеристик, пересчёт характеристик по критериям подобия) 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 газодинамического расчёта, необходимых для определения геометрических параметров проточной части на последующих этапах проектирования. Проверяемые индикаторы: ИОПК-5.1.

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 газодинамическим расчётом ступени проектируемой турбомашины (компрессора или турбины). Содержание индивидуального задания включает выбор типа лопаточной машины (центробежный компрессор, осевой компрессор, радиальная турбина, осевая турбина) в зависимости от объекта проектирования, определение исходных данных (расход воздуха, степень повышения/понижения давления, частота вращения), построение треугольников скоростей, расчёт основных геометрических параметров проточной части (диаметры, ширина каналов, углы лопаток), оценку КПД и степени реактивности. Индивидуальное задание выполняется в форме пояснительной записки объёмом 10–15 страниц с графическими построениями (треугольники скоростей, эскиз проточной части). Защита индивидуального задания проводится в форме презентации результатов перед преподавателем. Индивидуальное задание в рамках сквозного проекта позволяет комплексно оценить сформированность индикаторов ИОПК-5.1.

Экзамен

Промежуточная аттестация проводится в форме экзамена по завершении изучения дисциплины. Экзамен позволяет комплексно оценить знания, умения и навыки студента по всем разделам дисциплины. Экзаменационный билет включает два теоретических вопроса (по основным разделам теории лопаточных машин) и одно практическое задание (расчётная задача по газодинамическому расчёту ступени компрессора или турбины). Результаты экзамена определяют итоговую оценку по дисциплине и отражают степень сформированности знаний, необходимых для выполнения третьего этапа сквозного проекта «Расчётное обоснование, верификация и оптимизация». Проверяемые индикаторы: ИОПК-5.1.

Роль дисциплины в оценке результатов сквозного проекта

Дисциплина «Теория лопаточных машин» формирует фундаментальные знания, необходимые для выполнения третьего этапа сквозного проекта — «Расчётное обоснование, верификация и оптимизация». В рамках этого этапа студент должен выполнить газодинамический расчёт проточной части проектируемой турбомашины (компрессора или турбины), определить её основные геометрические параметры, оценить эффективность. 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 газодинамический расчёт является основой для последующего конструирования и прочностного анализа деталей лопаточной машины.

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 теории лопаточных машин, умеет строить треугольники скоростей, рассчитывать работу и КПД ступени, понимает принципы газодинамического расчёта. Это свидетельствует о сформированности на пороговом уровне индикаторов ИОПК-5.1 в части теоретических основ газодинамического расчёта 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 построении треугольников скоростей, не может рассчитать работу и КПД ступени, не понимает физического смысла основных параметров. Студент обязан ликвидировать задолженность по модулю до прохождения следующего рубежного контроля.

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 лопаточных машин, основ газовой динамики, теории решёток профилей, методов газодинамического расчёта ступеней осевых и центробежных компрессоров, осевых и радиальных турбин, а также характеристик лопаточных машин и критериев подобия. Уверенно и аргументированно отвечает на дополнительные вопросы, свободно владеет профессиональной терминологией. В контексте сквозного проекта такой уровень подготовки позволяет студенту самостоятельно выполнять газодинамический расчёт проточной части проектируемой турбомашины.

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 строить треугольники скоростей, рассчитывать работу и КПД ступени, но может испытывать затруднения при ответе на уточняющие вопросы или при объяснении сложных разделов (например, расчёт решёток профилей, анализ характеристик при переменных режимах). 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 построении треугольников скоростей, 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 построить треугольники скоростей, не понимает физического смысла основных параметров. Отсутствует понимание принципов работы лопаточных машин. Не способен ответить на дополнительные вопросы, не владеет профессиональной терминологией. Студент не готов к выполнению индивидуального задания в рамках сквозного проекта.

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 построения треугольников скоростей, расчёта работы и КПД ступени, газодинамического расчёта компрессора или турбины. 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 газодинамического расчёта, необходимыми для определения геометрических параметров проточной части.

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.

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 газодинамического расчёта, самостоятельно выбирает тип лопаточной машины, корректно определяет исходные данные, строит треугольники скоростей, рассчитывает основные геометрические параметры проточной части, оценивает КПД и степень реактивности. Пояснительная записка оформлена в соответствии с требованиями, графики и эскизы выполнены качественно. При защите студент свободно владеет материалом, аргументированно отвечает на вопросы, демонстрирует понимание физического смысла полученных результатов и их влияния на конструктивные параметры. Сформированность индикаторов ИОПК-5.1 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 треугольников скоростей. Студент демонстрирует понимание методов газодинамического расчёта, но может испытывать затруднения при обосновании выбора параметров или при анализе полученных результатов. 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 газодинамического расчёта, испытывает значительные затруднения при построении треугольников скоростей. 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 газодинамического расчёта, не может построить треугольники скоростей. 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.

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 классификации лопаточных машин, основ газовой динамики, теории решёток профилей, методов газодинамического расчёта ступеней осевых и центробежных компрессоров, осевых и радиальных турбин, а также характеристик лопаточных машин и критериев подобия. Уверенно и без ошибок выполняет практическое задание (газодинамический расчёт ступени), аргументирует последовательность решения, делает обоснованные выводы. Дает полные ответы на дополнительные вопросы, свободно владеет профессиональной терминологией. Сформированность индикаторов ИОПК-5.1 оценивается на продвинутом уровне, что подтверждает готовность студента к выполнению третьего этапа 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 строить треугольники скоростей, рассчитывать работу и КПД ступени. 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 третьего этапа сквозного проекта.

Соответствие методов контроля проверяемым индикаторам компетенций

В процессе изучения дисциплины оценивается сформированность знаний и навыков, необходимых для освоения индикаторов компетенции ОПК-5. Дисциплина является формирующей для указанной компетенции.

ИОПК-5.1. Умеет использовать свойства конструкционных и электротехнических материалов в расчетах параметров и режимов при разработке, проектировании и испытаниях энергетических установок, а также рассчитывать элементы и параметры энергетических машин и установок с учётом свойств конструкционных материалов. Формируется через изучение газодинамических процессов в лопаточных машинах, расчёт параметров потока (давления, температуры, скоростей), определение нагрузок на лопатки и диски. Эти расчёты определяют требования к материалам (жаропрочность, прочность, усталостная прочность), которые должны быть использованы при конструировании. Проверяется методами: текущее тестирование, устный опрос, практические занятия, индивидуальное задание, экзамен.

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 экзамена учитываются при формировании итоговой оценки по дисциплине и оценке выполнения третьего этапа сквозного проекта. Дисциплина «Теория лопаточных машин» закладывает содержательную основу для последующего формирования

компетенций на этапах конструирования и прочностного расчёта, обеспечивая студента знаниями и навыками, необходимыми для газодинамического расчёта проточной части, определения параметров потока, нагрузок на лопатки и диски, что в свою очередь определяет требования к конструкционным материалам и позволяет рассчитывать элементы лопаточных машин с учётом их свойств.

7.3 Оценочные средства

Текущий контроль

Модульная структура дисциплины

Дисциплина изучается в 6-м семестре. Семестр делится на два равных модуля (периода), каждый из которых включает определенные темы.

Модуль 1 (недели 1–8) — Основы газовой динамики и теория компрессоров

Включает темы: Тема 1. Введение. Основные понятия и классификация; Тема 2. Основы газовой динамики лопаточных машин; Тема 3. Решетки профилей; Тема 4. Теория осевого компрессора; Тема 5. Теория центробежного компрессора.

Модуль 2 (недели 9–16) — Теория турбин, характеристики и подобие

Включает темы: Тема 6. Теория осевой турбины; Тема 7. Теория радиальной турбины; Тема 8. Характеристики лопаточных машин; Тема 9. Подобие и моделирование в лопаточных машинах.

Рубежный контроль по модулям (устный опрос/собеседование)

Модуль 1. Основы газовой динамики и теория компрессоров

Перечень вопросов для собеседования:

1. Предмет и задачи теории лопаточных машин. Место дисциплины в сквозном проекте: газодинамический расчет проточной части проектируемой турбомашины.
2. Классификация лопаточных машин: по направлению потока (осевые, радиальные, диагональные), по назначению (компрессоры, турбины), по типу рабочего процесса (активные, реактивные). Основные параметры лопаточных машин.
3. Уравнение неразрывности потока. Уравнение количества движения (Эйлера). Уравнение энергии (первый закон термодинамики для потока).
4. Уравнение Эйлера для лопаточных машин (основное уравнение). Физический смысл и вывод. Теоретический напор (работа) ступени.
5. Степень реактивности. Влияние степени реактивности на треугольники скоростей. Понятие о циркуляции скорости.
6. Геометрические характеристики решетки профилей: хорда, шаг, угол установки, угол входа и выхода потока, густота решетки.
7. Аэродинамические характеристики решетки профилей: коэффициент подъемной силы, коэффициент лобового сопротивления, поляра профиля. Уравнение Н.Е. Жуковского для подъемной силы.
8. Потери в решетках профилей: профильные, концевые, вторичные. Влияние числа Маха и числа Рейнольдса на характеристики решетки. Методы снижения потерь.
9. Принцип действия осевого компрессора. Треугольники скоростей на входе и выходе из рабочего колеса. Степень повышения давления ступени. Работа ступени.
10. КПД ступени осевого компрессора. Потери в ступени. Влияние углов атаки и перегрузки.
11. Характеристики ступени осевого компрессора: зависимость степени повышения давления и КПД от расхода. Помпаж осевого компрессора: причины, признаки, последствия, способы предотвращения.
12. Многоступенчатый осевой компрессор: особенности расчета и согласования ступеней. Методы регулирования.
13. Принцип действия центробежного компрессора. Треугольники скоростей на входе и выходе из рабочего колеса. Работа компрессора. Степень повышения давления.

14. Эффективность диффузора. Потери в центробежном компрессоре: потери на трение, на вихреобразование, на утечки.

15. Характеристики центробежного компрессора: напорная характеристика, линия рабочих режимов, граница помпажа.

16. Влияние геометрических параметров (угла лопаток, формы диффузора) на характеристики центробежного компрессора. Особенности расчета рабочего колеса с радиальными и загнутыми назад лопатками.

Модуль 2. Теория турбин, характеристики и подобие

Перечень вопросов для собеседования:

1. Принцип действия осевой турбины. Треугольники скоростей на входе и выходе из рабочего колеса. Работа турбины. Степень понижения давления.

2. Степень реактивности осевой турбины. КПД осевой турбины. Потери в осевой турбине: профильные, концевые, на утечки.

3. Влияние числа Маха на характеристики осевой турбины. Особенности работы осевой турбины при переменных режимах.

4. Регулирование осевой турбины (изменяемая геометрия соплового аппарата). Системы охлаждения лопаток осевой турбины.

5. Принцип действия радиальной (центростремительной) турбины. Треугольники скоростей. Работа турбины. Степень реактивности.

6. Сравнение радиальной и осевой турбин: преимущества и недостатки, области применения. Потери в радиальной турбине.

7. Особенности расчета и проектирования радиальных турбин для турбокомпрессоров и малоразмерных ГТД. Конструктивные схемы радиальных турбин.

8. Понятие характеристики лопаточной машины. Приведенные характеристики компрессоров и турбин. Влияние частоты вращения на характеристики.

9. Универсальные характеристики. Понятие о линии рабочих режимов (working line). Совместная работа компрессора и турбины в турбокомпрессоре.

10. Анализ устойчивости работы турбокомпрессора. Методы построения и анализа характеристик по экспериментальным данным.

11. Критерии подобия в лопаточных машинах: число Маха (M), число Рейнольдса (Re), коэффициент расхода (φ), коэффициент напора (ψ).

12. Методы пересчета характеристик при изменении размеров, частоты вращения, параметров газа. Моделирование проточных частей.

13. Использование критериев подобия при проектировании и доводке лопаточных машин. Геометрическое подобие и его границы применимости.

14. Применение результатов газодинамического расчета для последующего конструирования лопаточных машин (определение профилей лопаток, выбор материалов, прочностной расчет).

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. **Какое уравнение является основным для расчёта работы лопаточной машины?**

2. A) Уравнение Бернулли

3. B) Уравнение Эйлера

4. C) Уравнение Навье-Стокса

5. D) Уравнение неразрывности

Правильный ответ: B

2. **Какой параметр характеризует отношение окружной составляющей абсолютной скорости к окружной скорости рабочего колеса?**

3. A) Степень реактивности

4. B) Коэффициент расхода

5. C) Коэффициент напора

6. D) Коэффициент лобового сопротивления

Правильный ответ: C

3. **Какое явление возникает в осевом компрессоре при чрезмерном уменьшении расхода воздуха?**

4. A) Запирание

5. B) Помпаж

6. C) Кавитация

7. D) Срыв потока

Правильный ответ: B

4. **Какой тип турбины наиболее часто применяется в малоразмерных ГТД и турбокомпрессорах?**

5. A) Осевая турбина

6. B) Радиальная (центростремительная) турбина

7. C) Диагональная турбина

8. D) Активная турбина

Правильный ответ: B

5. **Какой критерий подобия характеризует режим течения в лопаточной машине (ламинарный или турбулентный)?**

6. A) Число Маха (M)

7. B) Число Рейнольдса (Re)

8. C) Коэффициент расхода (φ)

9. D) Коэффициент напора (ψ)

Правильный ответ: B

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 газодинамическим расчётом ступени проектируемой турбомашины.

Содержание индивидуального задания:

Индивидуальное задание включает в себя выполнение следующих этапов:

1. **Выбор типа лопаточной машины.** Студент выбирает тип лопаточной машины для газодинамического расчёта в зависимости от объекта сквозного проектирования: центробежный компрессор (для турбокомпрессора), осевой компрессор (для малоразмерного ГТД), радиальная турбина (для турбокомпрессора или малоразмерного ГТД), осевая турбина (для малоразмерного ГТД). Выбор обосновывается назначением проектируемого изделия.

2. **Определение исходных данных.** На основе технического задания на проектирование (сформированного в рамках дисциплины «Конструкция газотурбинных двигателей») студент определяет исходные данные для газодинамического расчёта: массовый расход рабочего тела (воздуха или газа), давление и температура на входе, требуемая степень повышения/понижения давления, частота вращения ротора, параметры окружающей среды.

3. **Газодинамический расчёт ступени.** В зависимости от выбранного типа лопаточной машины выполняется расчёт:

   - для центробежного компрессора: определение параметров на входе и выходе из рабочего колеса, построение треугольников скоростей, расчёт работы компрессора, степени повышения давления, КПД, определение основных геометрических размеров (входной и выходной диаметры рабочего колеса, ширина каналов, углы лопаток);

- для осевого компрессора: расчёт параметров потока по радиусу, построение треугольников скоростей в среднем сечении, определение работы ступени, степени повышения давления, КПД, выбор формы профилей лопаток;
- для радиальной турбины: построение треугольников скоростей, расчёт работы турбины, степени понижения давления, КПД, определение геометрических параметров (диаметры, ширина каналов, углы лопаток);
- для осевой турбины: расчёт параметров потока, построение треугольников скоростей, определение работы, степени понижения давления, КПД, выбор формы профилей лопаток.

4. **Анализ результатов и подготовка выводов.** Проводится анализ полученных результатов, оценивается эффективность спроектированной ступени, формулируются выводы о соответствии расчётных параметров требованиям технического задания. Определяются рекомендации для последующего конструирования и прочностного расчёта.

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 выбора типа лопаточной машины;
- основную часть, содержащую исходные данные, методику расчёта, расчётные формулы, результаты расчёта в табличной форме;
- графическую часть (треугольники скоростей в масштабе, эскиз проточной части с указанием основных геометрических размеров);
- заключение с выводами по результатам выполненной работы;
- список использованных источников.

Примерные темы индивидуальных заданий:

1. Газодинамический расчёт центробежного компрессора для турбокомпрессора дизельного двигателя мощностью 150 кВт.
2. Газодинамический расчёт центробежного компрессора для турбокомпрессора бензинового двигателя с рабочим объёмом 2,0 л.
3. Газодинамический расчёт радиальной турбины для турбокомпрессора дизельного двигателя.
4. Газодинамический расчёт ступени осевого компрессора для малоразмерного ГТД мощностью 50 кВт.
5. Газодинамический расчёт ступени осевой турбины для малоразмерного ГТД.
6. Газодинамический расчёт радиальной турбины для малоразмерного ГТД мощностью 30 кВт.
7. Газодинамический расчёт центробежного компрессора с загнутыми назад лопатками для турбокомпрессора.
8. Газодинамический расчёт центробежного компрессора с радиальными лопатками и сравнение эффективности с вариантом с загнутыми назад лопатками.

Оценочные средства для практических занятий

Типовые задания для практических занятий

Модуль 1. Основы газовой динамики и теория компрессоров

Задание 1. Построение треугольников скоростей для ступени компрессора

По заданным параметрам: окружная скорость на среднем диаметре u, осевая составляющая абсолютной скорости c_a, угол входа потока в рабочее колесо α_1, угол выхода потока из рабочего колеса β_2. Построить треугольники скоростей на входе и выходе из рабочего колеса. Определить работу ступени, степень реактивности, изменение кинетической энергии в рабочем колесе.

Задание 2. Расчёт работы и степени реактивности по треугольникам скоростей

По заданным треугольникам скоростей (в численном виде) рассчитать работу ступени, степень реактивности, определить вклад реактивной и активной составляющих в работу. Сделать вывод о типе ступени (активная, реактивная).

Задание 3. Газодинамический расчёт ступени осевого компрессора

По заданным исходным данным: расход воздуха G, давление и температура на входе p1, T1, частота вращения n, средний диаметр Dcp, степень повышения давления πк. Выполнить расчёт ступени осевого компрессора. Определить окружную скорость, осевую скорость, построить треугольники скоростей, рассчитать работу, КПД, степень реактивности. Определить угол установки лопаток рабочего колеса и направляющего аппарата.

Задание 4. Построение характеристики ступени осевого компрессора

По заданным экспериментальным данным (или расчётным значениям) построить характеристику ступени осевого компрессора: зависимость степени повышения давления πк и КПД ηк от относительного расхода G/Gном. Определить область устойчивой работы, запас по помпажу.

Задание 5. Газодинамический расчёт ступени центробежного компрессора

По заданным исходным данным: расход воздуха G, давление и температура на входе p1, T1, частота вращения n, степень повышения давления πк. Выполнить расчёт ступени центробежного компрессора. Определить входной и выходной диаметры рабочего колеса, ширину каналов, построить треугольники скоростей, рассчитать работу, КПД. Определить угол лопаток на входе и выходе.

Модуль 2. Теория турбин, характеристики и подобие

Задание 6. Газодинамический расчёт ступени осевой турбины

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

Задание 7. Построение характеристики осевой турбины

По заданным экспериментальным данным (или расчётным значениям) построить характеристику осевой турбины: зависимость относительного расхода G/Gном и КПД ηт от степени понижения давления πт. Проанализировать влияние числа Маха на характеристики.

Задание 8. Газодинамический расчёт радиальной турбины

По заданным исходным данным: расход газа G, давление и температура на входе p1, T1, частота вращения n, степень понижения давления πт. Выполнить расчёт радиальной турбины. Определить входной и выходной диаметры рабочего колеса, ширину каналов, построить треугольники скоростей, рассчитать работу, КПД. Определить угол лопаток на входе и выходе.

Задание 9. Построение и анализ характеристики центробежного компрессора (по заданным данным)

По заданным значениям расхода G, степени повышения давления πк и КПД ηк для различных частот вращения построить универсальную характеристику центробежного компрессора. Нанести линию рабочих режимов. Определить запас по помпажу на расчётном режиме.

Задание 10. Построение линии совместной работы компрессора и турбины

Для заданного турбокомпрессора по характеристикам компрессора и турбины построить линии их совместной работы. Определить рабочую точку на характеристике компрессора. Проанализировать влияние изменения сопротивления системы наддува на положение рабочей точки.

Задание 11. Пересчёт характеристик компрессора по критериям подобия

По заданным характеристикам компрессора при частоте вращения n1 и параметрах на входе p1, T1 пересчитать характеристики для другой частоты вращения n2 и других параметров на входе p2, T2. Построить приведённые характеристики.

Задание 12. Комплексный расчёт ступени турбокомпрессора (компрессор + турбина)

Для заданных параметров двигателя (расход воздуха, давление наддува, температура отработавших газов) выполнить согласованный расчёт ступеней компрессора и турбины. Построить треугольники скоростей для обеих ступеней, определить основные геометрические размеры, оценить КПД турбокомпрессора.

Оценочные средства для курсовой работы (проекта)

Курсовой проект (курсовая работа) по дисциплине не предусмотрены учебным планом. Результаты освоения дисциплины (газодинамический расчёт проточной части) используются при выполнении курсового проекта по дисциплине «Конструирование лопаточных машин» (Б1.2.13) для определения геометрических параметров проточной части, а также в выпускной квалификационной работе.

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 индивидуального задания в рамках сквозного проекта (газодинамический расчёт ступени лопаточной машины) 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 по газодинамическому расчёту ступени).

Структура билета:

- **Вопрос 1** (Модуль 1): Основы газовой динамики лопаточных машин, теория компрессоров.
- **Вопрос 2** (Модуль 2): Теория турбин, характеристики лопаточных машин, подобие и моделирование.
- **Задание 3**: Расчётная задача (построение треугольников скоростей, газодинамический расчёт ступени компрессора или турбины).

Типовые экзаменационные билеты

Экзаменационный билет №1

Вопрос 1 (Модуль 1)

Уравнение Эйлера для лопаточных машин: вывод, физический смысл, применение для расчёта работы компрессора и турбины. Влияние степени реактивности на треугольники скоростей.

Вопрос 2 (Модуль 2)

Критерии подобия в лопаточных машинах: число Маха, число Рейнольдса, коэффициент расхода, коэффициент напора. Методы пересчёта характеристик при изменении размеров и режимных параметров. Применение критериев подобия в проектировании.

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 = 50000 об/мин, требуемая степень повышения давления $\pi_к$ = 2,0. Выполнить газодинамический расчёт: определить

окружную скорость на выходе из рабочего колеса, построить треугольники скоростей, рассчитать работу компрессора, КПД. Определить угол лопаток на выходе.

Экзаменационный билет №2

Вопрос 1 (Модуль 1)

Принцип действия осевого компрессора. Треугольники скоростей на входе и выходе из рабочего колеса. Степень повышения давления, работа, КПД ступени. Влияние угла атаки на характеристики ступени. Помпаж осевого компрессора: причины и способы предотвращения.

Вопрос 2 (Модуль 2)

Принцип действия радиальной (центростремительной) турбины. Треугольники скоростей. Работа, степень понижения давления, степень реактивности. Сравнение радиальной и осевой турбин: преимущества и недостатки, области применения.

Задание 3

Для радиальной турбины заданы: расход газа G = 0,4 кг/с, давление и температура на входе p1 = 0,3 МПа, T1 = 800 К, давление на выходе p2 = 0,1 МПа, частота вращения n = 60000 об/мин. Выполнить газодинамический расчёт: определить окружную скорость на входе, построить треугольники скоростей, рассчитать работу турбины, КПД. Определить угол лопаток на входе.

Экзаменационный билет №3

Вопрос 1 (Модуль 1)

Решётки профилей: геометрические и аэродинамические характеристики. Коэффициент подъёмной силы, коэффициент лобового сопротивления. Потери в решётках профилей. Уравнение Н.Е. Жуковского для подъёмной силы.

Вопрос 2 (Модуль 2)

Характеристики лопаточных машин. Приведенные характеристики компрессоров и турбин. Линия рабочих режимов (working line). Совместная работа компрессора и турбины в турбокомпрессоре. Анализ устойчивости работы.

Задание 3

Для осевой турбины заданы: окружная скорость на среднем диаметре u = 300 м/с, осевая составляющая скорости ca = 200 м/с, угол выхода потока из соплового аппарата $\alpha_1 = 20°$, угол входа потока в рабочее колесо $\beta_1 = 30°$, угол выхода потока из рабочего колеса $\beta_2 = 25°$. Построить треугольники скоростей. Рассчитать работу турбины, степень реактивности, окружную составляющую абсолютной скорости на выходе.

Полный перечень теоретических вопросов к экзамену по каждой теме

Модуль 1. Основы газовой динамики и теория компрессоров

1. Предмет и задачи теории лопаточных машин. Место дисциплины в сквозном проекте. Классификация лопаточных машин. Основные параметры.
2. Уравнение неразрывности потока. Уравнение количества движения (Эйлера). Уравнение энергии (первый закон термодинамики для потока).
3. Уравнение Эйлера для лопаточных машин: вывод, физический смысл, применение. Теоретический напор (работа) ступени.
4. Степень реактивности. Влияние степени реактивности на треугольники скоростей. Понятие о циркуляции скорости.
5. Геометрические характеристики решетки профилей: хорда, шаг, угол установки, угол входа и выхода потока, густота решетки.
6. Аэродинамические характеристики решетки профилей: коэффициент подъемной силы, коэффициент лобового сопротивления, поляра профиля. Уравнение Н.Е. Жуковского.
7. Потери в решетках профилей: профильные, концевые, вторичные. Влияние числа Маха и числа Рейнольдса на характеристики решетки.
8. Принцип действия осевого компрессора. Треугольники скоростей. Степень повышения давления, работа, КПД ступени.
9. Потери в ступени осевого компрессора. Влияние углов атаки и перегрузки.
10. Характеристики ступени осевого компрессора. Помпаж осевого компрессора: причины, признаки, последствия, способы предотвращения.

11. Многоступенчатый осевой компрессор: особенности расчета и согласования ступеней. Методы регулирования.

12. Принцип действия центробежного компрессора. Треугольники скоростей. Работа, степень повышения давления.

13. Эффективность диффузора. Потери в центробежном компрессоре.

14. Характеристики центробежного компрессора: напорная характеристика, линия рабочих режимов, граница помпажа.

15. Влияние геометрических параметров (угла лопаток, формы диффузора) на характеристики центробежного компрессора.

16. Особенности расчета рабочего колеса центробежного компрессора с радиальными и загнутыми назад лопатками.

Модуль 2. Теория турбин, характеристики и подобие

17. Принцип действия осевой турбины. Треугольники скоростей. Работа, степень понижения давления, степень реактивности.

18. КПД осевой турбины. Потери в осевой турбине. Влияние числа Маха на характеристики.

19. Особенности работы осевой турбины при переменных режимах. Регулирование осевой турбины (изменяемая геометрия соплового аппарата).

20. Системы охлаждения лопаток осевой турбины.

21. Принцип действия радиальной (центростремительной) турбины. Треугольники скоростей. Работа, степень понижения давления, степень реактивности.

22. Сравнение радиальной и осевой турбин: преимущества и недостатки, области применения. Потери в радиальной турбине.

23. Особенности расчета и проектирования радиальных турбин для турбокомпрессоров и малоразмерных ГТД.

24. Понятие характеристики лопаточной машины. Приведенные характеристики компрессоров и турбин. Влияние частоты вращения на характеристики.

25. Универсальные характеристики. Понятие о линии рабочих режимов (working line). Совместная работа компрессора и турбины в турбокомпрессоре.

26. Анализ устойчивости работы турбокомпрессора. Методы построения и анализа характеристик по экспериментальным данным.

27. Критерии подобия в лопаточных машинах: число Маха (M), число Рейнольдса (Re), коэффициент расхода (φ), коэффициент напора (ψ).

28. Методы пересчета характеристик при изменении размеров, частоты вращения, параметров газа. Моделирование проточных частей.

29. Использование критериев подобия при проектировании и доводке лопаточных машин. Геометрическое подобие и его границы применимости.

30. Применение результатов газодинамического расчета для последующего конструирования лопаточных машин (определение профилей лопаток, выбор материалов, прочностной расчет).

Примеры практических заданий для экзамена

Пример 1. Построение треугольников скоростей и расчёт параметров ступени осевого компрессора

Для ступени осевого компрессора заданы:

- окружная скорость на среднем диаметре $u = 250$ м/с;
- осевая составляющая скорости $c_a = 150$ м/с (постоянна по радиусу);
- угол входа потока в рабочее колесо $\alpha_1 = 25°$;
- угол выхода потока из рабочего колеса $\beta_2 = 35°$.

Требуется:

1. Построить треугольники скоростей на входе и выходе из рабочего колеса.
2. Определить работу ступени L.
3. Определить степень реактивности ρ.

4. Определить угол установки лопаток рабочего колеса на входе β1л и на выходе β2л.

Пример 2. Газодинамический расчёт центробежного компрессора

Для центробежного компрессора заданы:

- расход воздуха G = 0,6 кг/с;
- давление на входе p1 = 0,1 МПа;
- температура на входе T1 = 288 К;
- частота вращения n = 60000 об/мин;
- степень повышения давления πк = 2,2.

Требуется:

1. Определить окружную скорость на выходе из рабочего колеса u2.
2. Построить треугольники скоростей на входе и выходе, приняв, что вход радиальный, а на выходе угол лопаток β2л = 45°.
3. Рассчитать работу компрессора L.
4. Оценить КПД компрессора, приняв, что действительная работа в 1,1 раза больше теоретической.
5. Определить выходной диаметр рабочего колеса D2.

Пример 3. Расчёт параметров радиальной турбины

Для радиальной турбины заданы:

- расход газа G = 0,5 кг/с;
- давление на входе p1 = 0,35 МПа;
- температура на входе T1 = 850 К;
- давление на выходе p2 = 0,1 МПа;
- частота вращения n = 55000 об/мин;
- средний диаметр на входе D1ср = 0,12 м.

Требуется:

1. Определить окружную скорость на входе u1.
2. Построить треугольники скоростей на входе и выходе, приняв, что вход без закрутки (c1u = 0), а на выходе поток осевой (c2u = 0).
3. Рассчитать работу турбины L.
4. Определить степень понижения давления πт.
5. Оценить КПД турбины, приняв, что действительная работа составляет 0,85 от теоретической.

Пример 4. Построение характеристики центробежного компрессора и определение рабочей точки

Для центробежного компрессора заданы значения степени повышения давления πк и КПД ηк для различных расходов G при частоте вращения n = 50000 об/мин:

G, кг/с	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
πк	1,8	2,0	2,1	2,2	2,1	1,9
ηк	0,65	0,72	0,76	0,78	0,75	0,68

Требуется:

1. Построить характеристику компрессора в координатах πк — G.
2. Нанести на характеристику линию рабочих режимов (принять, что двигатель потребляет расход, пропорциональный частоте вращения).
3. Определить рабочую точку при номинальном режиме (G = 0,55 кг/с).
4. Оценить запас по помпажу на номинальном режиме.