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

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ГИДРОГАЗОДИНАМИКА В ПРОЕКТИРОВАНИИ И ВЕРИФИКАЦИИ ДВИГАТЕЛЕЙ

Направление подготовки/ специальность
13.03.03 «Энергетическое машиностроение»

Профиль/ специализация
Поршневые двигатели и турбомашины

Квалификация
Бакалавр

Форма обучения
Очная

Москва, 2026

Разработчик(и):
к.т.н., профессор  / Р.Х. Курмаев /

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 6
3.3. Содержание дисциплины 9
3.4. Тематика семинарских/практических и лабораторных занятий 11
3.4.1. Семинарские/практические занятия 11
3.4.2. Лабораторные занятия 12
3.5. Тематика курсовых проектов (курсовых работ) 12
4. Учебно-методическое и информационное обеспечение 13
4.1. Нормативные документы и ГОСТы 13
4.2. Основная литература 14
4.3. Дополнительная литература 14
4.4. Электронные образовательные ресурсы 14
4.5. Лицензионное и свободно распространяемое программное обеспечение 14
4.6. Современные профессиональные базы данных и информационные справочные системы 14
5. Материально-техническое обеспечение 15
6. Методические рекомендации 16
6.1. Методические рекомендации для преподавателя по организации обучения 16
6.2. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины 17
7. Фонд оценочных средств 17
7.1 Методы контроля и оценивания результатов обучения 17
7.2 Шкала и критерии оценивания результатов обучения 21
7.3 Оценочные средства 28

1.Цели, задачи и планируемые результаты обучения по дисциплине

Целью освоения дисциплины является формирование у обучающихся теоретических знаний и практических навыков в области гидравлики и технической газовой динамики, а также освоение методов компьютерного моделирования гидрогазодинамических процессов, протекающих в системах и элементах поршневых двигателей и турбомашин, для их расчётного обоснования, анализа и оптимизации на третьем этапе сквозного проектирования «Расчётное обоснование, верификация и оптимизация».

Задачами дисциплины являются:

В части гидравлики (4 семестр):

– изучение основных физических свойств жидкостей, законов гидростатики и гидродинамики;

– освоение методов расчёта гидравлических потерь при движении жидкости в трубопроводах и каналах различной формы;

– формирование навыков гидравлического расчёта элементов систем двигателя (топливных, масляных, охлаждения);

– изучение основ теории подобия гидродинамических процессов и методов моделирования.

В части технической газовой динамики (5 семестр):

– изучение основных закономерностей движения сжимаемых сред, включая скорость звука, число Маха и режимы течения;

– освоение методов расчёта параметров газового потока при различных режимах (дозвуковом, звуковом, сверхзвуковом);

– формирование навыков анализа течений в элементах проточной части двигателей (впускные и выпускные каналы, диффузоры, сопла, компрессоры, турбины);

– изучение методов расчёта потерь энергии в газовых потоках и способов их минимизации.

Общие задачи по вычислительной гидрогазодинамике:

– освоение современных CFD-пакетов для численного моделирования течений жидкостей и газов;

– формирование навыков построения расчётных сеток, задания граничных условий и выбора моделей турбулентности;

– приобретение навыков анализа и визуализации результатов CFD-моделирования (поля скоростей, давлений, температур);

– изучение методов верификации расчётных моделей путём сравнения с экспериментальными данными.

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-2. Способен разрабатывать алгоритмы и компьютерные программы, пригодные для практического применения при разработке, проектировании и испытаниях энергетических установок	**ИОПК-2.1.** Умеет разрабатывать алгоритмы и создавать компьютерные программы, пригодные для практического применения при разработке, проектировании и испытаниях энергетических установок

Роль дисциплины в формировании компетенций:

Формирующая. Дисциплина обеспечивает понимание алгоритмов численного моделирования, используемых в CFD-пакетах (вычислительная гидрогазодинамика). Студенты

изучают методы построения расчётных сеток, задания граничных условий, выбора моделей турбулентности, а также основы численного решения уравнений Навье-Стокса, неразрывности и энергии. На практических занятиях осваиваются навыки работы в CFD-пакетах: импорт геометрии, построение расчётной сетки, настройка решателя, визуализация и анализ результатов (поля давления, скорости, температуры). Полученные знания и навыки позволяют разрабатывать алгоритмы и создавать компьютерные программы (на уровне настройки и параметризации CFD-расчётов) для практического применения при разработке, проектировании и испытаниях энергетических установок (ИОПК-2.1).

2. Место дисциплины в структуре образовательной программы

Дисциплина **«Вычислительная гидрогазодинамика в проектировании и верификации двигателей»** относится к **обязательной части блока Б.1** учебного плана (код дисциплины: Б1.1.19) и изучается в **4-м и 5-м семестрах**.

Данная дисциплина является ключевой для **третьего этапа сквозного проекта «Расчётное обоснование, верификация и оптимизация»**, обеспечивая освоение современных методов компьютерного моделирования гидрогазодинамических процессов, протекающих в системах впуска, выпуска, охлаждения, смазки и в проточных частях турбокомпрессоров.

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

- **Физика** (школьный курс, а также дисциплина «Физика» (Б1.1.26.3, 2-3 семестры): знание основ механики жидкости и газа, законов сохранения массы, импульса и энергии необходимо для понимания гидрогазодинамических процессов.
- **Математика** (школьный курс, а также дисциплины «Линейная алгебра» (Б1.1.26.1, 1 семестр) и «Математический анализ» (Б1.1.26.2, 2 семестр): владение дифференциальным и интегральным исчислением, методами решения дифференциальных уравнений необходимо для понимания математических моделей течений.
- **Термодинамика** (Б1.1.17, 3 семестр): знание термодинамических процессов необходимо для понимания энергетических аспектов течений сжимаемых сред.
- **Информатика** (школьный курс) и **Технологии искусственного интеллекта** (Б1.1.5, 1 семестр): владение компьютером и понимание основ алгоритмизации необходимо для работы в CFD-системах.
- **Автоматизированное проектирование в двигателестроении** (Б1.1.12, 2-3 семестры): владение CAD-системами необходимо для создания или импорта геометрических моделей проточных частей.

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

- **Агрегаты наддува** (Б1.2.7, 6 семестр): результаты CFD-анализа компрессоров и турбин используются для их оптимизации и согласования с двигателем (III этап).
- **Системы поршневых двигателей** (Б1.2.5, 5 семестр): гидравлические расчёты применяются для проектирования топливных, масляных систем и систем охлаждения (III этап).
- **Теплообмен и теплообменные аппараты в энергетическом машиностроении** (Б1.2.6, 5 семестр): требуют знаний гидродинамики для расчёта теплообменников (III этап).

- **Расчет и оптимизация деталей двигателя** (Б1.2.9, 6 семестр): сопряжённый теплообмен (СНТ) требует интеграции CFD и теплового анализа (III этап).
- **Методы испытаний поршневых двигателей и турбомашин** (Б1.2.14, 7 семестр): результаты CFD-моделирования могут быть верифицированы экспериментально (IV этап).
- **Виброакустика на транспорте** (Б1.2.11, 7 семестр): пульсации давления в газовоздушном тракте являются источниками шума и вибрации.
- Все последующие дисциплины, связанные с расчётом и доводкой двигателей, 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	
			4	5
1	Аудиторные занятия	72	36	36
	В том числе:			
1.1	Лекции	36	18	18
1.2	Семинарские/практические занятия	36	18	18
1.3	Лабораторные занятия	–	–	–
2	Самостоятельная работа	72	36	36
3	Промежуточная аттестация			
	Зачет/диф.зачет/экзамен	Экзамен	Экзамен	Экзамен
	Курсовой проект	–	–	–
	Курсовая работа	–	–	–
	Итого	**144**	**72**	**72**

3.2. Тематический план изучения дисциплины

№ п/п	Название раздела / темы	Всего часов	Аудиторная работа	Лекции	Семинарские/ практические занятия	Самостоятельная работа
Семестр 4	**Гидравлика**					
1	Тема 1. Введение. Основные физические свойства жидкостей	6	2	2	–	4
2	Тема 2. Гидростатика. Давление жидкости. Законы Паскаля и Архимеда	10	4	2	2	6
3	Тема 3. Основы кинематики и динамики жидкости. Уравнения неразрывности и Бернулли	14	8	4	4	6
4	Тема 4. Режимы движения жидкости. Ламинарное и турбулентное течение	10	4	2	2	6
5	Тема 5. Гидравлические потери. Потери по длине и местные потери	14	8	4	4	6
6	Тема 6. Истечение жидкости через отверстия и насадки	10	4	2	2	6
7	Тема 7. Гидравлический расчёт трубопроводов	8	6	2	4	2

	Итого за 4 семестр	**72**	**36**	**18**	**18**	**36**
Семестр 5	**Техническая газовая динамика и основы CFD**					
8	Тема 8. Основные понятия газовой динамики. Сжимаемость газа	12	4	2	2	4
9	Тема 9. Основные уравнения газовой динамики. Уравнения неразрывности, движения и энергии	18	6	2	4	6
10	Тема 10. Скорость звука. Число Маха. Классификация течений	12	4	2	2	4
11	Тема 11. Течение газа в каналах переменного сечения. Сопла и диффузоры	18	6	4	2	6
12	Тема 12. Прямые и косые скачки уплотнения	12	4	2	2	4
13	Тема 13. Основы численного моделирования (CFD). Уравнения Навье-Стокса	12	4	2	2	4
14	Тема 14. Построение расчётных сеток. Граничные условия	12	4	2	2	4

15	Тема 15. Модели турбулентности	12	4	2	2	4
	Итого за 5 семестр	**72**	**36**	**18**	**18**	**36**
	ИТОГО по дисциплине	**144**	**72**	**36**	**36**	**72**

3.3. Содержание дисциплины

- **Семестр 4. Гидравлика**
- **Тема 1. Введение. Основные физические свойства жидкостей**
- Предмет и задачи гидравлики. Роль дисциплины в проектировании и верификации двигателей (гидравлические расчёты систем смазки, охлаждения, топливоподачи). Жидкость как сплошная среда. Основные физические свойства жидкостей: плотность, удельный вес, сжимаемость, температурное расширение, вязкость (динамическая и кинематическая). Ньютоновские и неньютоновские жидкости. Идеальная и реальная жидкости. Силы, действующие в жидкости: массовые и поверхностные.
- **Тема 2. Гидростатика. Давление жидкости. Законы Паскаля и Архимеда**
- Гидростатическое давление и его свойства. Основное уравнение гидростатики. Закон Паскаля и его применение в гидроприводах. Абсолютное, избыточное (манометрическое) давление и вакуум. Единицы измерения давления. Давление жидкости на плоские и криволинейные поверхности. Эпюры давления. Закон Архимеда. Условия плавания тел. Применение гидростатики в расчётах систем питания и смазки двигателя.
- **Тема 3. Основы кинематики и динамики жидкости. Уравнения неразрывности и Бернулли**
- Методы описания движения жидкости: метод Лагранжа и метод Эйлера. Установившееся и неустановившееся движение. Линии тока, трубка тока, элементарная струйка. Расход жидкости (объёмный и массовый). Уравнение неразрывности (сплошности) для потока жидкости. Уравнение Бернулли для элементарной струйки идеальной жидкости. Геометрический, физический и энергетический смысл уравнения Бернулли. Уравнение Бернулли для потока реальной жидкости. Потери напора. Практическое применение уравнения Бернулли (водомер Вентури, трубка Пито).
- **Тема 4. Режимы движения жидкости. Ламинарное и турбулентное течение**
- Опыты Рейнольдса. Ламинарный и турбулентный режимы течения. Критерий Рейнольдса (число Рейнольдса). Критическое число Рейнольдса. Распределение скоростей по сечению потока при ламинарном и турбулентном течении. Касательные напряжения при ламинарном и турбулентном течении. Турбулентная вязкость. Понятие о гидродинамически гладких и шероховатых трубах.
- **Тема 5. Гидравлические потери. Потери по длине и местные потери**
- Причины гидравлических потерь. Общие понятия о потерях напора. Потери напора по длине (линейные потери) при ламинарном и турбулентном течении.

Формула Дарси-Вейсбаха. Коэффициент гидравлического трения λ. Формулы для расчёта λ (Пуазейля, Блазиуса, Альтшуля, Никурадзе, Мурина). Местные гидравлические потери. Причины возникновения. Формула Вейсбаха. Коэффициенты местных сопротивлений (вход в трубу, внезапное расширение, внезапное сужение, повороты, задвижки, клапаны). Принцип сложения потерь. Гидравлический расчёт трубопроводов.

- **Тема 6. Истечение жидкости через отверстия и насадки**
- Истечение жидкости из малого отверстия в тонкой стенке при постоянном напоре. Скорость и расход истечения. Коэффициенты скорости, сжатия, расхода. Истечение через насадки (цилиндрические, конические, коноидальные). Сравнение расхода через отверстие и насадки. Применение в системах впрыска топлива (форсунки).
- **Тема 7. Гидравлический расчёт трубопроводов**
- Классификация трубопроводов (простые и сложные, короткие и длинные). Последовательное и параллельное соединение трубопроводов. Разомкнутые и кольцевые сети. Расчёт потребного напора. Построение характеристики сети. Гидравлический удар в трубах. Основы расчёта гидравлических систем двигателя (системы смазки, охлаждения, топливоподачи).
- **Семестр 5. Техническая газовая динамика и основы CFD**
- **Тема 8. Основные понятия газовой динамики. Сжимаемость газа**
- Предмет газовой динамики. Отличие газов от жидкостей. Сжимаемость как основное свойство газа. Понятие об идеальном и реальном газе. Параметры состояния газа: давление, плотность, температура. Уравнение состояния идеального газа. Термодинамические процессы: изохорный, изобарный, изотермический, адиабатный. Показатель адиабаты. Энтальпия и энтропия газа. Роль газовой динамики в проектировании двигателей (впуск, выпуск, наддув, охлаждение).
- **Тема 9. Основные уравнения газовой динамики. Уравнения неразрывности, движения и энергии**
- Система уравнений, описывающих течение газа. Уравнение неразрывности для сжимаемой среды. Уравнение движения (Эйлера). Уравнение сохранения энергии для потока газа. Связь с первым законом термодинамики. Уравнение Бернулли для сжимаемого газа (при адиабатном течении). Зависимость параметров газа от скорости.
- **Тема 10. Скорость звука. Число Маха. Классификация течений**
- Физическая природа скорости звука. Вывод формулы для скорости звука в газе. Число Маха M как основной критерий подобия в газовой динамике. Классификация течений: дозвуковые ($M<1$), околозвуковые ($M\approx1$), сверхзвуковые ($M>1$), гиперзвуковые ($M>>1$). Влияние сжимаемости на характер течения. Понятие о критических параметрах.
- **Тема 11. Течение газа в каналах переменного сечения. Сопла и диффузоры**
- Особенности течения газа в сужающихся и расширяющихся каналах. Зависимость скорости и давления от площади сечения. Сопло Лаваля. Расчёт параметров потока в сопле Лаваля. Режимы работы сопла. Диффузор. Течение газа в диффузоре. Потери в диффузорах. Применение в двигателях: впускные и выпускные каналы, сопла турбокомпрессоров, выхлопные системы.
- **Тема 12. Прямые и косые скачки уплотнения**

- Возникновение скачков уплотнения при сверхзвуковом течении. Прямой скачок уплотнения. Изменение параметров газа на прямом скачке (давление, температура, плотность, скорость). Потери полного давления на скачке. Косой скачок уплотнения. Угол наклона скачка и угол поворота потока. Взаимодействие скачков уплотнения. Применение в расчётах входных устройств и выпускных систем.

- **Тема 13. Основы численного моделирования (CFD). Уравнения Навье-Стокса**

- Понятие о вычислительной гидрогазодинамике (CFD). Основные этапы CFD-анализа. Полные уравнения Навье-Стокса для сжимаемого газа. Проблемы их прямого численного решения (DNS). Понятие о методе конечных объёмов. Дискретизация расчётной области.

- **Тема 14. Построение расчётных сеток. Граничные условия**

- Типы расчётных сеток: структурированные, неструктурированные, гибридные. Требования к качеству сетки (ортогональность, сглаживание, размер ячейки). Пограничный слой и сетка вблизи стенки (y+). Задание граничных условий: на входе, на выходе, на стенках, оси симметрии, периодические условия. Подготовка геометрии для расчёта (очистка, упрощение).

- **Тема 15. Модели турбулентности**

- Роль турбулентности в технических приложениях. Осреднение по Рейнольдсу (RANS). Уравнения Рейнольдса и проблема замыкания. Модели турбулентности: алгебраические, модели с одним и двумя уравнениями (k-ε, k-ω, SST). Прямое численное моделирование (DNS) и моделирование крупных вихрей (LES) – краткий обзор. Критерии выбора модели турбулентности. Обработка и анализ результатов CFD-расчёта (поля давления, скорости, температуры, визуализация течения). Верификация и валидация расчётных моделей.

-

3.4. Тематика семинарских/практических и лабораторных занятий

3.4.1. Семинарские/практические занятия

Семестр 4

№ п/п	№ раздела дисциплины	Наименование практического занятия	Трудоемкость (час.)
1	Тема 2	Расчёт давления жидкости на стенки и днище резервуара (топливного бака)	2
2	Тема 3	Применение уравнения Бернулли для расчёта скорости и давления в потоке	2
3	Тема 3	Построение напорной и пьезометрической линии для трубопровода	2
4	Тема 4	Определение режима течения в трубопроводах систем смазки и охлаждения	2
5	Тема 5	Расчёт потерь напора по длине в масляной магистрали	2
6	Тема 5	Расчёт местных потерь напора в элементах систем двигателя (фильтры, краны)	2

7	Тема 6	Расчёт параметров истечения топлива через жиклёр (форсунку)	2
8	Тема 7	Гидравлический расчёт системы смазки двигателя (подбор насоса)	2
9	Тема 7	Гидравлический расчёт системы охлаждения (определение диаметров труб)	2
	Итого за 4 семестр		**18**

Семестр 5

№ п/п	№ раздела дисциплины	Наименование практического занятия	Трудоемкость (час.)
1	Тема 9	Расчёт параметров газа при адиабатном течении с использованием газодинамических функций	2
2	Тема 10	Расчёт скорости звука и числа Маха в различных сечениях газовоздушного тракта	2
3	Тема 11	Расчёт параметров потока в сужающемся сопле и сопле Лаваля	2
4	Тема 11	Расчёт параметров диффузора впускной системы	2
5	Тема 12	Расчёт параметров газа на прямом скачке уплотнения	2
6	Тема 13	Знакомство с интерфейсом CFD-пакета. Импорт геометрии	2
7	Тема 14	Построение расчётной сетки для простой геометрии (канал, труба)	2
8	Тема 15	Выбор модели турбулентности и настройка решателя для задачи обтекания	2
9	Тема 15	Анализ и визуализация результатов CFD-расчёта (поля скоростей, давления)	2
	Итого за 5 семестр		**18**

3.4.2. Лабораторные занятия

- Лабораторные занятия по дисциплине не предусмотрены учебным планом.
-

3.5. Тематика курсовых проектов (курсовых работ)

- Курсовой проект (курсовая работа) по дисциплине не предусмотрены. Однако результаты освоения дисциплины (навыки гидравлического и газодинамического расчёта, а также основы работы в CFD-пакетах) используются при выполнении последующих курсовых проектов по дисциплинам «Конструирование и расчет поршневых двигателей», «Агрегаты наддува» и в выпускной квалификационной работе.
-

4. Учебно-методическое и информационное обеспечение

4.1. Нормативные документы и ГОСТы

Общие и терминологические стандарты

ГОСТ Р 52289-2004 — Транспортные средства. Термины и определения.

(Для единой терминологии гидравлических и газодинамических систем.)

Гидравлические системы и оборудование

ГОСТ 21348-75 — Насосы гидравлические. Термины и определения.

(Основные понятия и классификация гидравлических насосов.)

ГОСТ 21349-75 — Насосы гидравлические. Общие технические условия.

(Требования к конструкции и испытаниям.)

ГОСТ 21350-75 — Двигатели гидравлические. Термины и определения.

(Терминология и классификация гидродвигателей.)

ГОСТ 21351-75 — Двигатели гидравлические. Общие технические условия.

ГОСТ 12.2.007.9-75 — ССБТ. Машины и оборудование транспортные. Двигатели внутреннего сгорания. Общие требования безопасности.

(В части гидравлических систем смазки и охлаждения.)

ГОСТ 12.2.007.7-75 — ССБТ. Машины и оборудование транспортные. Ходовая часть автомобилей. Требования безопасности.

(Если в гидросистемах используются элементы ходовой части.)

ГОСТ 12.2.007.10-75 — ССБТ. Машины и оборудование транспортные. Электрооборудование автомобилей. Требования безопасности.

ГОСТ Р 51317.6.1-2007 — Электромагнитная совместимость технических средств.

Расчёты и испытания гидросистем

ГОСТ 28084-89 — Гидравлические машины. Методы испытаний.

(Методики испытаний насосов и гидродвигателей.)

ГОСТ 21703-76 — Трубопроводы и арматура. Методы определения потерь давления.

(Расчёт гидравлических сопротивлений.)

ГОСТ 12.2.007.9-75 — ССБТ. Машины и оборудование транспортные. Двигатели внутреннего сгорания. Общие требования безопасности.

ГОСТ 12.2.007.14-81 — ССБТ. Машины и оборудование транспортные. Камеры сгорания. Требования безопасности.

ГОСТ 12.2.007.18-81 — ССБТ. Машины и оборудование транспортные. Турбины газовые. Требования безопасности.

ГОСТ 12.2.007.19-81 — ССБТ. Машины и оборудование транспортные. Компрессоры газовые. Требования безопасности.

ГОСТ 12.2.007.20-81 — ССБТ. Машины и оборудование транспортные. Сопла и диффузоры. Требования безопасности.

ГОСТ 12.2.007.21-81 — ССБТ. Машины и оборудование транспортные. Газодинамические испытания.

Методы моделирования и диагностики

ГОСТ Р 41.61-99 (UNECE Reg. 61) — Диагностика систем управления двигателем.

ГОСТ Р 41.35-99 (UNECE Reg. 35) — Электронные системы управления двигателем и трансмиссией.

ГОСТ 12.2.007.16-81 — Методы контроля и диагностики гидравлических систем, применяемые также для газодинамических систем.

4.2. Основная литература

1. Доманский, И. В. Механика жидкости и газа / И. В. Доманский, В. А. Некрасов. — 2-е изд., стер. — Санкт-Петербург : Лань, 2023. — 140 с. — ISBN 978-5-507-45645-1. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: https://e.lanbook.com/book/277058
2. Моргунов, К. П. Механика жидкости и газа / К. П. Моргунов. — 4-е изд., стер. — Санкт-Петербург : Лань, 2023. — 208 с. — ISBN 978-5-507-47902-3. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: https://e.lanbook.com/book/332123

4.3. Дополнительная литература

1. Механика жидкости и газа : Е. Н. Миркина, О. В. Михеева, С. С. Орлова, Т. А. Панкова. — Саратов : Вавиловский университет, 2022. — 85 с. — ISBN 978-5-9999-3572-4. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: https://e.lanbook.com/book/363710
2. Козлов, В. С. Механика жидкости и газа : / В. С. Козлов, С. В. Котельникова. — Красноярск : СибГУ им. академика М. Ф. Решетнёва, 2022 — Часть 1 : Гидромеханика — 2022. — 246 с. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: https://e.lanbook.com/book/269984

4.4. Электронные образовательные ресурсы

Механика жидкости и газа в энергетическом машиностроении
https://online.mospolytech.ru/user/index.php?id=15829

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

Четвёртый семестр

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 «Вычислительная гидрогазодинамика в проектировании и верификации двигателей» является **формирующей** для компетенции **ОПК-2**, обеспечивая теоретические знания и практические навыки в области гидравлики, а также освоение методов компьютерного моделирования гидрогазодинамических процессов, протекающих в системах и элементах поршневых двигателей и турбомашин, для их расчётного обоснования, анализа и оптимизации на третьем этапе сквозного проектирования «Расчётное обоснование, верификация и оптимизация».

В процессе изучения дисциплины оценивается сформированность следующих компетенций и индикаторов:

ОПК-2. Способен разрабатывать алгоритмы и компьютерные программы, пригодные для практического применения при разработке, проектировании и испытаниях энергетических установок

Индикаторы достижения компетенции:

• **ИОПК-2.1.** Умеет разрабатывать алгоритмы и создавать компьютерные программы, пригодные для практического применения при разработке, проектировании и испытаниях энергетических установок.

Дисциплина «Вычислительная гидрогазодинамика в проектировании и верификации двигателей» является ключевой для третьего этапа сквозного проекта «Расчётное обоснование, верификация и оптимизация», обеспечивая освоение современных методов компьютерного моделирования гидрогазодинамических процессов, протекающих в системах впуска, выпуска, охлаждения, смазки и в проточных частях турбокомпрессоров. В четвёртом семестре изучается раздел «Гидравлика», включающий основные физические свойства жидкостей, законы гидростатики и гидродинамики, методы расчёта гидравлических потерь, гидравлический расчёт элементов систем двигателя, основы теории подобия гидродинамических процессов. Полученные знания и навыки являются основой для последующего освоения алгоритмов численного моделирования в CFD-пакетах.

В процессе изучения дисциплины используются следующие методы контроля.

Текущее (рубежное) тестирование по модулям

Проводится после завершения изучения каждого из двух модулей четвёртого семестра. Тестирование осуществляется в письменной или компьютерной форме и включает вопросы закрытого и открытого типа, а также расчётные задачи, направленные на проверку знаний физических свойств жидкостей, законов гидростатики и гидродинамики, методов расчёта гидравлических потерь, режимов течения жидкости, истечения через отверстия и насадки, а также гидравлического расчёта трубопроводов. Результаты тестирования используются для оценки уровня освоения материала модуля и определения готовности студента к дальнейшему обучению. Проверяемые индикаторы: ИОПК-2.1 (понимание алгоритмов гидравлического расчёта как основы для последующего численного моделирования).

Устный опрос (собеседование)

Проводится в ходе практических занятий для проверки понимания студентом теоретического материала, способности аргументированно излагать законы гидростатики и гидродинамики, объяснять физический смысл гидравлических потерь, анализировать режимы течения жидкости. 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 анализировать гидравлические характеристики систем двигателя. Проверяемые индикаторы: ИОПК-2.1.

Практические занятия

В ходе выполнения практических заданий (расчёт давления жидкости на стенки, применение уравнения Бернулли, определение режимов течения, расчёт потерь напора по длине и местных потерь, расчёт параметров истечения, гидравлический расчёт трубопроводов)

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 гидравлического расчёта элементов систем двигателя, необходимых для последующего CFD-моделирования. Проверяемые индикаторы: ИОПК-2.1.

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 гидравлическим расчётом системы двигателя (системы смазки, охлаждения или топливоподачи). Содержание индивидуального задания включает гидравлический расчёт трубопровода (определение потерь напора, подбор насоса), определение режимов течения, расчёт местных сопротивлений, а также подготовку исходных данных для последующего CFD-моделирования. Индивидуальное задание выполняется в форме пояснительной записки объёмом 10–15 страниц. Защита индивидуального задания проводится в форме презентации результатов перед преподавателем. Индивидуальное задание в рамках сквозного проекта позволяет комплексно оценить сформированность индикатора ИОПК-2.1.

Экзамен

Промежуточная аттестация по итогам четвёртого семестра проводится в форме экзамена. Экзамен позволяет комплексно оценить знания, умения и навыки студента по разделу «Гидравлика». Экзаменационный билет включает два теоретических вопроса (по основным разделам гидравлики) и одно практическое задание (расчётная задача). 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-2.1.

Роль дисциплины в оценке результатов сквозного проекта

Дисциплина «Вычислительная гидрогазодинамика в проектировании и верификации двигателей» формирует фундаментальные знания, необходимые для выполнения третьего этапа сквозного проекта — «Расчётное обоснование, верификация и оптимизация». В рамках этого этапа студент должен выполнить гидравлический расчёт систем двигателя (смазки, охлаждения, топливоподачи), определить потери давления, подобрать насосное оборудование, а также подготовить исходные данные для последующего CFD-моделирования течений в проточных частях. Результаты освоения дисциплины оцениваются в ходе защиты индивидуального задания и отчёта по третьему этапу сквозного проекта. Оценка сформированности компетенции ОПК-2 по дисциплине учитывается при подведении итогов выполнения сквозного проекта в целом.

Пятый семестр

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 «Вычислительная гидрогазодинамика в проектировании и верификации двигателей» является **формирующей** для компетенции **ОПК-2**, обеспечивая теоретические знания и практические навыки в области технической газовой динамики, а также освоение методов компьютерного моделирования гидрогазодинамических процессов, протекающих в системах и элементах поршневых двигателей и турбомашин, для их расчётного обоснования, анализа и оптимизации на третьем этапе сквозного проектирования «Расчётное обоснование, верификация и оптимизация».

В процессе изучения дисциплины оценивается сформированность следующих компетенций и индикаторов:

ОПК-2. Способен разрабатывать алгоритмы и компьютерные программы, пригодные для практического применения при разработке, проектировании и испытаниях энергетических установок

Индикаторы достижения компетенции:

• **ИОПК-2.1.** Умеет разрабатывать алгоритмы и создавать компьютерные программы, пригодные для практического применения при разработке, проектировании и испытаниях энергетических установок.

Дисциплина «Вычислительная гидрогазодинамика в проектировании и верификации двигателей» является ключевой для третьего этапа сквозного проекта «Расчётное обоснование, верификация и оптимизация», обеспечивая освоение современных методов компьютерного моделирования гидрогазодинамических процессов, протекающих в системах впуска, выпуска, охлаждения, смазки и в проточных частях турбокомпрессоров. В пятом семестре изучается раздел «Техническая газовая динамика и основы CFD», включающий основные понятия газовой динамики, уравнения неразрывности, движения и энергии, скорость звука и число Маха, классификацию течений, течение газа в каналах переменного сечения, скачки уплотнения, основы численного моделирования (CFD), построение расчётных сеток, модели турбулентности. Полученные знания и навыки позволяют разрабатывать алгоритмы и создавать компьютерные программы (на уровне настройки и параметризации CFD-расчётов) для практического применения при разработке, проектировании и испытаниях энергетических установок.

В процессе изучения дисциплины используются следующие методы контроля.

Текущее (рубежное) тестирование по модулям

Проводится после завершения изучения каждого из двух модулей пятого семестра. Тестирование осуществляется в письменной или компьютерной форме и включает вопросы закрытого и открытого типа, а также расчётные задачи, направленные на проверку знаний основных понятий газовой динамики, уравнений неразрывности, движения и энергии, скорости звука и числа Маха, классификации течений, расчёта параметров потока в соплах и диффузорах, скачков уплотнения, основ численного моделирования, построения расчётных сеток и моделей турбулентности. Результаты тестирования используются для оценки уровня освоения материала модуля и определения готовности студента к дальнейшему обучению. Проверяемые индикаторы: ИОПК-2.1 (понимание алгоритмов численного моделирования, используемых в CFD-пакетах).

Устный опрос (собеседование)

Проводится в ходе практических занятий для проверки понимания студентом теоретического материала, способности аргументированно излагать законы газовой динамики, объяснять физический смысл числа Маха, анализировать течение газа в каналах, объяснять принципы построения расчётных сеток и выбора моделей турбулентности. 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 анализировать газодинамические характеристики систем двигателя и обосновывать выбор параметров CFD-модели. Проверяемые индикаторы: ИОПК-2.1.

Практические занятия

В ходе выполнения практических заданий (расчёт параметров газа при адиабатном течении, расчёт скорости звука и числа Маха, расчёт параметров потока в сужающемся сопле и сопле Лаваля, расчёт параметров диффузора, расчёт параметров газа на прямом скачке уплотнения, знакомство с интерфейсом CFD-пакета, построение расчётной сетки, выбор модели турбулентности, анализ результатов CFD-расчёта) 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 и основ работы в CFD-пакетах, необходимых для выполнения третьего этапа сквозного проекта. Проверяемые индикаторы: ИОПК-2.1.

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 элемента системы двигателя (впускной тракт, выпускной тракт, турбокомпрессор) и подготовкой исходных данных для CFD-моделирования. Содержание индивидуального задания включает расчёт параметров газового потока в заданном элементе, определение числа Маха, расчёт потерь полного давления, построение расчётной сетки в упрощённой геометрии, выбор модели турбулентности, проведение пробного CFD-расчёта, анализ полученных результатов, верификацию модели по результатам термодинамического расчёта. Индивидуальное задание выполняется в форме пояснительной записки объёмом 10–15 страниц с графическими материалами (поля давлений, скоростей). Защита индивидуального задания проводится в форме презентации результатов перед преподавателем. Индивидуальное задание в рамках сквозного проекта позволяет комплексно оценить сформированность индикатора ИОПК-2.1.

Экзамен

Промежуточная аттестация по итогам пятого семестра проводится в форме экзамена. Экзамен позволяет комплексно оценить знания, умения и навыки студента по разделу «Техническая газовая динамика и основы CFD». Экзаменационный билет включает два теоретических вопроса (по основным разделам газовой динамики и основ CFD) и одно практическое задание (расчётная задача или анализ результатов CFD-расчёта). 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-2.1.

Роль дисциплины в оценке результатов сквозного проекта

Дисциплина «Вычислительная гидрогазодинамика в проектировании и верификации двигателей» формирует фундаментальные знания и практические навыки, необходимые для выполнения третьего этапа сквозного проекта — «Расчётное обоснование, верификация и оптимизация». В рамках этого этапа студент должен выполнить газодинамический расчёт элементов системы впуска и выпуска двигателя, провести CFD-моделирование течения в проточных частях, определить потери давления, распределение скоростей и давлений, верифицировать расчётную модель по результатам термодинамического расчёта. Результаты освоения дисциплины оцениваются в ходе защиты индивидуального задания и отчёта по третьему этапу сквозного проекта. Оценка сформированности компетенции ОПК-2 по дисциплине учитывается при подведении итогов выполнения сквозного проекта в целом.

7.2 Шкала и критерии оценивания результатов обучения

Четвёртый семестр

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 гидравлики, знает законы гидростатики и гидродинамики, умеет рассчитывать гидравлические потери, определять режимы течения. Это свидетельствует о сформированности на пороговом уровне индикатора ИОПК-2.1 в части теоретических основ гидравлики, необходимых для последующего численного моделирования.

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 применении законов гидростатики и гидродинамики, не может рассчитать гидравлические потери. Студент обязан ликвидировать задолженность по модулю до прохождения следующего рубежного контроля.

Критерии оценки итогового тестирования по курсу

Итоговое тестирование проводится после завершения изучения всех модулей четвёртого семестра. Тест состоит из 30 заданий, охватывающих весь материал раздела «Гидравлика». Каждое верно выполненное задание оценивается в 1 балл. Максимальное количество баллов — 30.

Оценка «отлично» выставляется студенту, набравшему от 29 до 30 баллов (97–100% правильных ответов). Студент демонстрирует системные теоретические знания по всем разделам гидравлики, уверенно применяет законы гидростатики и гидродинамики, рассчитывает гидравлические потери, определяет режимы течения, выполняет гидравлический расчёт трубопроводов. Сформированность индикатора ИОПК-2.1 оценивается на продвинутом уровне, что позволяет студенту успешно выполнить раздел сквозного проекта, связанный с гидравлическим расчётом систем двигателя.

Оценка «хорошо» выставляется студенту, набравшему от 24 до 28 баллов (80–97% правильных ответов). Студент в целом демонстрирует системные теоретические знания, владеет большинством терминов, но допускает отдельные неточности в сложных вопросах, связанных с расчётом местных потерь или гидравлическим расчётом разветвлённых сетей. Сформированность индикатора оценивается на базовом уровне, достаточном для выполнения сквозного проекта.

Оценка «удовлетворительно» выставляется студенту, набравшему от 18 до 23 баллов (60–80% правильных ответов). Студент демонстрирует знание основного материала, но допускает ошибки в деталях, испытывает затруднения при расчёте гидравлических потерь, не в полной мере владеет профессиональной терминологией. Сформированность индикатора оценивается на пороговом уровне, что требует дополнительной работы для успешного выполнения сквозного проекта.

Оценка «неудовлетворительно» выставляется студенту, набравшему от 0 до 17 баллов (менее 60% правильных ответов). Студент не демонстрирует системных знаний, не владеет основными понятиями, не может применить законы гидравлики для решения практических задач, допускает грубые ошибки. Сформированность индикатора не достигла порогового уровня, что делает невозможным выполнение раздела сквозного проекта по гидравлическому расчёту без дополнительной подготовки.

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 физических свойств жидкостей, законов гидростатики и гидродинамики, методов расчёта гидравлических потерь, режимов течения жидкости, истечения через отверстия и насадки. Уверенно и аргументированно отвечает на дополнительные вопросы, свободно владеет профессиональной терминологией. В контексте сквозного проекта такой уровень подготовки позволяет студенту самостоятельно выполнять гидравлический расчёт систем двигателя.

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 решать типовые задачи, но может испытывать затруднения при ответе на уточняющие вопросы или при объяснении сложных разделов (например, гидравлический удар). В целом демонстрирует хорошее владение профессиональной терминологией.

Оценка «удовлетворительно» выставляется студенту, который имеет знания только основного материала, но не усвоил его деталей. Студент допускает неточности и ошибки в изложении, испытывает затруднения при расчёте гидравлических потерь, 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 применить законы гидравлики для решения практических задач. Отсутствует понимание физических процессов течения жидкостей. Не способен ответить на дополнительные вопросы, не владеет профессиональной терминологией. Студент не готов к выполнению раздела сквозного проекта по гидравлическому расчёту.

Критерии оценки практических занятий

Оценка «зачтено» выставляется студенту, который выполнил практическое задание правильно, в установленные сроки. Студент продемонстрировал понимание методики решения задачи, способность применять теоретические знания для расчёта давления жидкости, скоростей и расходов, потерь напора, режимов течения, параметров истечения. 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 гидравлического расчёта, необходимыми для проектирования систем двигателя.

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 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 гидравлического расчёта, самостоятельно выполняет расчёт потерь напора в трубопроводе, определяет режимы течения, рассчитывает местные сопротивления, подбирает насосное оборудование, обосновывает принятые решения. Пояснительная записка оформлена в соответствии с требованиями, содержит все необходимые расчёты и графические материалы. При защите студент свободно владеет материалом, аргументированно отвечает на вопросы, демонстрирует понимание физических процессов, протекающих в гидравлических системах двигателя. Сформированность индикатора ИОПК-2.1 оценивается на продвинутом уровне.

Оценка «хорошо» выставляется студенту, который выполнил индивидуальное задание в полном объёме, но допускает отдельные неточности в расчётах или неполноту в обосновании выбора насоса. Студент демонстрирует понимание методов гидравлического расчёта, способен выполнять основные расчёты, но может испытывать затруднения при расчёте сложных разветвлённых сетей. Пояснительная записка оформлена в соответствии с требованиями, но содержит незначительные замечания. При защите студент в целом отвечает на вопросы, но может допускать неточности. Сформированность индикатора 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 гидравлики, испытывает значительные затруднения при расчёте потерь напора и определении режимов течения. Пояснительная записка оформлена с нарушениями требований. При защите студент отвечает на вопросы неуверенно, требует наводящих вопросов. Сформированность индикатора оценивается на пороговом уровне.

Оценка «неудовлетворительно» выставляется студенту, который не выполнил индивидуальное задание, выполнил его не в полном объёме или допустил грубые ошибки. Студент не демонстрирует понимания методов гидравлического расчёта, не может выполнить расчёты. Пояснительная записка отсутствует или оформлена с грубыми нарушениями. При защите студент не отвечает на вопросы, не владеет профессиональной терминологией. Сформированность индикатора 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 физических свойств жидкостей, законов гидростатики и гидродинамики, методов расчёта гидравлических потерь, режимов течения жидкости, истечения через отверстия и насадки, гидравлического расчёта трубопроводов. Уверенно и без ошибок выполняет практическое задание (расчётную задачу), аргументирует последовательность решения, делает обоснованные выводы. Даёт полные ответы на дополнительные вопросы, свободно владеет профессиональной терминологией. Сформированность индикатора ИОПК-2.1 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 решать типовые задачи. 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 индикатора 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 индикатора 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 индикатора не достигла порогового уровня, что делает невозможным выполнение третьего этапа сквозного проекта.

Соответствие методов контроля проверяемым индикаторам компетенций

В процессе изучения дисциплины в четвёртом семестре оценивается сформированность знаний и навыков, необходимых для освоения индикатора компетенции **ОПК-2**. Дисциплина является формирующей для указанной компетенции.

Индикатор	Формируемые навыки	Методы контроля
ИОПК-2.1	Умеет разрабатывать алгоритмы и создавать компьютерные программы для CFD-расчётов (на уровне понимания алгоритмов гидравлического расчёта, подготовки исходных данных для численного моделирования)	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 «Вычислительная гидрогазодинамика в проектировании и верификации двигателей» закладывает содержательную основу для последующего освоения CFD-методов в пятом семестре, обеспечивая студента знаниями и навыками, необходимыми для гидравлического расчёта систем двигателя, понимания физических процессов течения жидкостей и газов, а также для подготовки исходных данных для компьютерного моделирования.

Пятый семестр

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 газовой динамики, знает уравнения неразрывности, движения и энергии, понимает физический смысл числа Маха, умеет рассчитывать параметры потока в соплах и диффузорах, понимает принципы построения расчётных сеток и выбора моделей турбулентности. Это свидетельствует о сформированности на пороговом уровне индикатора ИОПК-2.1 в части теоретических основ газовой динамики и CFD.

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 применении уравнений газовой динамики, не может рассчитать параметры потока в соплах, не понимает принципов CFD-моделирования. Студент обязан ликвидировать задолженность по модулю до прохождения следующего рубежного контроля.

Критерии оценки итогового тестирования по курсу

Итоговое тестирование проводится после завершения изучения всех модулей пятого семестра. Тест состоит из 30 заданий, охватывающих весь материал раздела «Техническая газовая динамика и основы CFD». Каждое верно выполненное задание оценивается в 1 балл. Максимальное количество баллов — 30.

Оценка «отлично» выставляется студенту, набравшему от 29 до 30 баллов (97–100% правильных ответов). Студент демонстрирует системные теоретические знания по всем разделам газовой динамики и основ CFD, уверенно рассчитывает параметры газового потока, определяет число Маха, выполняет расчёт сопел и диффузоров, анализирует скачки уплотнения, понимает принципы построения расчётных сеток и выбора моделей турбулентности. Сформированность индикатора ИОПК-2.1 оценивается на продвинутом уровне, что позволяет студенту успешно выполнить раздел сквозного проекта, связанный с газодинамическим расчётом и CFD-моделированием.

Оценка «хорошо» выставляется студенту, набравшему от 24 до 28 баллов (80–97% правильных ответов). Студент в целом демонстрирует системные теоретические знания, владеет большинством терминов, но допускает отдельные неточности в сложных вопросах, связанных с расчётом скачков уплотнения или выбором моделей турбулентности. Сформированность индикатора оценивается на базовом уровне, достаточном для выполнения сквозного проекта.

Оценка «удовлетворительно» выставляется студенту, набравшему от 18 до 23 баллов (60–80% правильных ответов). Студент демонстрирует знание основного материала, но допускает ошибки в деталях, испытывает затруднения при расчёте параметров потока в соплах, не в полной мере владеет профессиональной терминологией. Сформированность индикатора оценивается на пороговом уровне, что требует дополнительной работы для успешного выполнения сквозного проекта.

Оценка «неудовлетворительно» выставляется студенту, набравшему от 0 до 17 баллов (менее 60% правильных ответов). Студент не демонстрирует системных знаний, не владеет основными понятиями, не может рассчитать параметры газового потока, допускает грубые ошибки. Сформированность индикатора не достигла порогового уровня, что делает невозможным выполнение раздела сквозного проекта по газодинамическому расчёту без дополнительной подготовки.

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 основных понятий газовой динамики, уравнений неразрывности, движения и энергии, скорости звука и числа Маха, классификации течений, течения газа в каналах переменного сечения, скачков уплотнения, основ численного моделирования, построения расчётных сеток, моделей турбулентности. Уверенно и аргументированно отвечает на дополнительные вопросы, свободно владеет профессиональной терминологией. В контексте сквозного проекта такой уровень

подготовки позволяет студенту самостоятельно выполнять газодинамические расчёты и CFD-моделирование элементов двигателя.

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 решать типовые задачи, но может испытывать затруднения при ответе на уточняющие вопросы или при объяснении сложных разделов (например, скачки уплотнения, модели турбулентности). В целом демонстрирует хорошее владение профессиональной терминологией.

Оценка «удовлетворительно» выставляется студенту, который имеет знания только основного материала, но не усвоил его деталей. Студент допускает неточности и ошибки в изложении, испытывает затруднения при расчёте параметров потока, 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 применить уравнения газовой динамики для решения практических задач. Отсутствует понимание физических процессов течения сжимаемых сред. Не способен ответить на дополнительные вопросы, не владеет профессиональной терминологией. Студент не готов к выполнению раздела сквозного проекта по газодинамическому расчёту.

Критерии оценки практических занятий

Оценка «зачтено» выставляется студенту, который выполнил практическое задание правильно, в установленные сроки. Студент продемонстрировал понимание методики решения задачи, способность применять теоретические знания для расчёта параметров газового потока, определения числа Маха, расчёта сопел и диффузоров, анализа скачков уплотнения, работы в CFD-пакете, построения расчётных сеток, выбора моделей турбулентности, анализа результатов. 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 и основами CFD-моделирования, необходимыми для проектирования систем двигателя.

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 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 и CFD-моделирования, самостоятельно выполняет расчёт параметров газового потока, определяет число Маха, рассчитывает потери полного давления, строит расчётную сетку, выбирает модель турбулентности, проводит пробный CFD-расчёт, анализирует результаты, выполняет верификацию модели по результатам термодинамического расчёта. Пояснительная записка оформлена в соответствии с требованиями, содержит все необходимые расчёты и графические материалы. При защите студент свободно владеет материалом, аргументированно отвечает на вопросы, демонстрирует понимание физических процессов, протекающих в газодинамических системах двигателя. Сформированность индикатора ИОПК-2.1 оценивается на продвинутом уровне.

Оценка «хорошо» выставляется студенту, который выполнил индивидуальное задание в полном объёме, но допускает отдельные неточности в расчётах или неполноту в обосновании выбора модели турбулентности. Студент демонстрирует понимание методов газодинамического расчёта и основ CFD, способен выполнять основные расчёты, но может испытывать затруднения при анализе сложных течений или верификации модели. Пояснительная записка оформлена в соответствии с требованиями, но содержит незначительные замечания. При защите студент в

целом отвечает на вопросы, но может допускать неточности. Сформированность индикатора 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 газовой динамики и основ CFD, испытывает значительные затруднения при расчёте параметров потока и построении расчётных сеток. Пояснительная записка оформлена с нарушениями требований. При защите студент отвечает на вопросы неуверенно, требует наводящих вопросов. Сформированность индикатора оценивается на пороговом уровне.

Оценка «неудовлетворительно» выставляется студенту, который не выполнил индивидуальное задание, выполнил его не в полном объёме или допустил грубые ошибки. Студент не демонстрирует понимания методов газодинамического расчёта и основ CFD, не может выполнить расчёты. Пояснительная записка отсутствует или оформлена с грубыми нарушениями. При защите студент не отвечает на вопросы, не владеет профессиональной терминологией. Сформированность индикатора 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 основных понятий газовой динамики, уравнений неразрывности, движения и энергии, скорости звука и числа Маха, классификации течений, течения газа в каналах переменного сечения, скачков уплотнения, основ численного моделирования, построения расчётных сеток, моделей турбулентности. Уверенно и без ошибок выполняет практическое задание (расчётную задачу или анализ результатов CFD-расчёта), аргументирует последовательность решения, делает обоснованные выводы. Даёт полные ответы на дополнительные вопросы, свободно владеет профессиональной терминологией. Сформированность индикатора ИОПК-2.1 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 решать типовые задачи. 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 индикатора 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 индикатора 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 индикатора не достигла порогового уровня, что делает невозможным выполнение третьего этапа сквозного проекта.

Соответствие методов контроля проверяемым индикаторам компетенций

В процессе изучения дисциплины в пятом семестре оценивается сформированность знаний и навыков, необходимых для освоения индикатора компетенции **ОПК-2**. Дисциплина является формирующей для указанной компетенции.

Индикатор	Формируемые навыки	Методы контроля
ИОПК-2.1	Умеет разрабатывать алгоритмы и создавать компьютерные программы для CFD-расчётов (понимание алгоритмов численного моделирования, построение расчётных сеток, выбор моделей турбулентности, обработка результатов)	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 «Вычислительная гидрогазодинамика в проектировании и верификации двигателей» закладывает содержательную основу для последующего применения CFD-методов в профессиональной деятельности, обеспечивая студента знаниями и навыками, необходимыми для газодинамического расчёта систем двигателя, проведения численного моделирования течений, верификации расчётных моделей и оптимизации конструкций.

7.3 Оценочные средства

7.3.1 Текущий контроль

Четвёртый семестр

Модульная структура дисциплины (четвёртый семестр)

Дисциплина изучается в 4-м и 5-м семестрах. Четвёртый семестр посвящён разделу «Гидравлика». Семестр делится на два равных модуля (периода), каждый из которых включает определённые темы.

Модуль 1 (недели 1–8) — Основы гидростатики и гидродинамики

Включает темы: Тема 1. Введение. Основные физические свойства жидкостей; Тема 2. Гидростатика. Давление жидкости. Законы Паскаля и Архимеда; Тема 3. Основы кинематики и динамики жидкости. Уравнения неразрывности и Бернулли; Тема 4. Режимы движения жидкости. Ламинарное и турбулентное течение.

Модуль 2 (недели 9–16) — Гидравлические потери. Истечение. Расчёт трубопроводов

Включает темы: Тема 5. Гидравлические потери. Потери по длине и местные потери; Тема 6. Истечение жидкости через отверстия и насадки; Тема 7. Гидравлический расчёт трубопроводов.

Рубежный контроль по модулям (устный опрос/собеседование)

Модуль 1. Основы гидростатики и гидродинамики

Перечень вопросов для собеседования:

1. Предмет и задачи гидравлики. Роль дисциплины в проектировании и верификации двигателей (гидравлические расчёты систем смазки, охлаждения, топливоподачи).
2. Жидкость как сплошная среда. Основные физические свойства жидкостей: плотность, удельный вес, сжимаемость, температурное расширение, вязкость (динамическая и кинематическая). Ньютоновские и неньютоновские жидкости. Идеальная и реальная жидкости.
3. Силы, действующие в жидкости: массовые и поверхностные. Гидростатическое давление и его свойства.
4. Основное уравнение гидростатики. Закон Паскаля и его применение в гидроприводах.
5. Абсолютное, избыточное (манометрическое) давление и вакуум. Единицы измерения давления.
6. Давление жидкости на плоские и криволинейные поверхности. Эпюры давления. Закон Архимеда. Условия плавания тел.
7. Применение гидростатики в расчётах систем питания и смазки двигателя.

8. Методы описания движения жидкости: метод Лагранжа и метод Эйлера. Установившееся и неустановившееся движение.

9. Линии тока, трубка тока, элементарная струйка. Расход жидкости (объёмный и массовый). Уравнение неразрывности (сплошности) для потока жидкости.

10. Уравнение Бернулли для элементарной струйки идеальной жидкости. Геометрический, физический и энергетический смысл уравнения Бернулли.

11. Уравнение Бернулли для потока реальной жидкости. Потери напора.

12. Практическое применение уравнения Бернулли (водомер Вентури, трубка Пито).

13. Опыты Рейнольдса. Ламинарный и турбулентный режимы течения. Критерий Рейнольдса (число Рейнольдса). Критическое число Рейнольдса.

14. Распределение скоростей по сечению потока при ламинарном и турбулентном течении. Касательные напряжения при ламинарном и турбулентном течении.

15. Турбулентная вязкость. Понятие о гидродинамически гладких и шероховатых трубах.

Модуль 2. Гидравлические потери. Истечение. Расчёт трубопроводов

Перечень вопросов для собеседования:

1. Причины гидравлических потерь. Общие понятия о потерях напора. Потери напора по длине (линейные потери) при ламинарном и турбулентном течении.

2. Формула Дарси-Вейсбаха. Коэффициент гидравлического трения λ. Формулы для расчёта λ (Пуазейля, Блазиуса, Альтшуля, Никурадзе, Мурина).

3. Местные гидравлические потери. Причины возникновения. Формула Вейсбаха. Коэффициенты местных сопротивлений (вход в трубу, внезапное расширение, внезапное сужение, повороты, задвижки, клапаны).

4. Принцип сложения потерь. Гидравлический расчёт трубопроводов.

5. Истечение жидкости из малого отверстия в тонкой стенке при постоянном напоре. Скорость и расход истечения. Коэффициенты скорости, сжатия, расхода.

6. Истечение через насадки (цилиндрические, конические, коноидальные). Сравнение расхода через отверстие и насадки. Применение в системах впрыска топлива (форсунки).

7. Классификация трубопроводов (простые и сложные, короткие и длинные). Последовательное и параллельное соединение трубопроводов.

8. Разомкнутые и кольцевые сети. Расчёт потребного напора. Построение характеристики сети.

9. Гидравлический удар в трубах. Основы расчёта гидравлических систем двигателя (системы смазки, охлаждения, топливоподачи).

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). Проверяемые индикаторы: ИОПК-2.1 (понимание алгоритмов гидравлического расчёта как основы для последующего численного моделирования).

Пример тестовых заданий (один вариант)

1. **Какое свойство жидкости характеризует её способность сопротивляться взаимному перемещению частиц?**

- A) Плотность
- B) Сжимаемость
- C) Вязкость
- D) Температурное расширение

Правильный ответ: C

2. **Какое уравнение описывает распределение давления в покоящейся жидкости?**

- A) Уравнение Бернулли

- B) Основное уравнение гидростатики
- C) Уравнение неразрывности
- D) Уравнение Дарси-Вейсбаха

Правильный ответ: B

3. **Какое число является критерием подобия для определения режима течения жидкости?**
   - A) Число Эйлера (Eu)
   - B) Число Фруда (Fr)
   - C) Число Рейнольдса (Re)
   - D) Число Ньютона (Ne)

Правильный ответ: C

4. **По какой формуле рассчитываются потери напора по длине?**
   - A) Формула Вейсбаха
   - B) Формула Дарси-Вейсбаха
   - C) Формула Пуазейля
   - D) Формула Блазиуса

Правильный ответ: B

5. **Какой тип насадки обеспечивает наибольший расход при истечении жидкости?**
   - A) Цилиндрический внешний
   - B) Цилиндрический внутренний
   - C) Конический сходящийся
   - D) Конический расходящийся

Правильный ответ: C

Оценочные средства для индивидуального задания в рамках сквозного проекта (4 семестр)

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 гидравлическим расчётом системы двигателя (системы смазки, охлаждения или топливоподачи). Проверяемые индикаторы: ИОПК-2.1.

Содержание индивидуального задания:

Индивидуальное задание включает в себя выполнение следующих этапов:

1. **Анализ гидравлической системы двигателя.** Студент выбирает одну из систем двигателя (система смазки, система охлаждения, система топливоподачи). Проводится анализ принципиальной схемы системы, определяются основные элементы: насос, фильтры, радиаторы, трубопроводы, местные сопротивления (повороты, сужения, клапаны). Составляется расчётная схема трубопровода.
2. **Определение режимов течения и расчёт потерь напора.** Для заданных расходов жидкости и геометрических параметров трубопроводов определяются скорости течения, числа Рейнольдса, устанавливается режим течения (ламинарный или турбулентный). Рассчитываются потери напора по длине для каждого участка с использованием формулы Дарси-Вейсбаха и коэффициента гидравлического трения. Рассчитываются местные потери напора для каждого местного сопротивления.
3. **Расчёт суммарных потерь напора и потребного напора насоса.** Определяются суммарные потери напора в системе. Рассчитывается потребный напор насоса с учётом геометрической высоты подъёма и избыточного давления в конечной точке. Строится характеристика сети.
4. **Подбор насосного оборудования.** По рассчитанным параметрам (подача, напор) подбирается насос (шестеренчатый, центробежный и т.п.) для обеспечения требуемых параметров системы. Обосновывается выбор типа насоса.

5. **Подготовка исходных данных для CFD-моделирования.** На основе выполненного гидравлического расчёта формулируются исходные данные для последующего CFD-моделирования: расходы, давления на входе и выходе, граничные условия.

Требования к оформлению:

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

- титульный лист с указанием темы задания, ФИО студента, группы, руководителя;
- содержание;
- введение с обоснованием актуальности гидравлического расчёта выбранной системы;
- основную часть, содержащую анализ системы, расчёт режимов течения, расчёт потерь напора, расчёт потребного напора, подбор насоса, подготовку исходных данных для CFD;
- схему системы (принципиальную и расчётную);
- заключение с выводами по результатам выполненной работы;
- список использованных источников.

Примерные темы индивидуальных заданий:

1. Гидравлический расчёт системы смазки двигателя с мокрым картером.
2. Гидравлический расчёт системы охлаждения двигателя (жидкостной).
3. Гидравлический расчёт топливной системы бензинового двигателя с распределённым впрыском.
4. Гидравлический расчёт топливной системы дизельного двигателя (Common Rail, низкого давления).
5. Гидравлический расчёт системы охлаждения турбокомпрессора.
6. Гидравлический расчёт масляной магистрали смазки подшипников коленчатого вала.

Оценочные средства для практических занятий (4 семестр)

Типовые задания для практических занятий

Модуль 1. Основы гидростатики и гидродинамики

Задание 1. Расчёт давления жидкости на стенки и днище резервуара (топливного бака)

Для заданного резервуара (цилиндрический, прямоугольный) с жидкостью (бензин, дизельное топливо, масло) определить давление на дно, на боковую стенку, построить эпюру давления. Определить силу давления на стенку.

Задание 2. Применение уравнения Бернулли для расчёта скорости и давления в потоке

Для заданного трубопровода переменного сечения определить скорость и давление в различных сечениях. Построить напорную и пьезометрическую линии.

Задание 3. Построение напорной и пьезометрической линии для трубопровода

Для заданного трубопровода с заданными размерами и расходами построить напорную и пьезометрическую линии. Определить потери напора на участках.

Задание 4. Определение режима течения в трубопроводах систем смазки и охлаждения

Для заданных параметров трубопроводов систем двигателя (диаметр, расход, вязкость жидкости) определить число Рейнольдса, установить режим течения. Сделать вывод о характере течения.

Модуль 2. Гидравлические потери. Истечение. Расчёт трубопроводов

Задание 5. Расчёт потерь напора по длине в масляной магистрали

Для заданной масляной магистрали (длина, диаметр, расход, вязкость масла) рассчитать потери напора по длине. Определить коэффициент гидравлического трения.

Задание 6. Расчёт местных потерь напора в элементах систем двигателя (фильтры, краны)

Для заданных элементов системы (фильтр, клапан, поворот) рассчитать местные потери напора. Использовать справочные значения коэффициентов местных сопротивлений.

Задание 7. Расчёт параметров истечения топлива через жиклёр (форсунку)

Для заданных параметров жиклёра (диаметр, коэффициент расхода) и перепада давления рассчитать скорость истечения, расход топлива.

Задание 8. Гидравлический расчёт системы смазки двигателя (подбор насоса)

Для заданной схемы системы смазки (с мокрым картером) определить суммарные потери напора, потребный напор насоса. По рассчитанным параметрам подобрать масляный насос (шестеренчатый) по производительности и давлению.

Задание 9. Гидравлический расчёт системы охлаждения (определение диаметров труб)

Для заданной системы охлаждения с известным расходом охлаждающей жидкости и допустимой скоростью определить диаметры трубопроводов. Рассчитать потери напора и подобрать водяной насос.

Оценочные средства для курсовой работы (проекта) — 4 семестр

Курсовой проект (курсовая работа) по дисциплине в четвёртом семестре не предусмотрены учебным планом. Курсовой проект выполняется в пятом семестре как завершающий этап изучения дисциплины.

Пятый семестр

Модульная структура дисциплины (пятый семестр)

Дисциплина изучается в 4-м и 5-м семестрах. Пятый семестр посвящён разделу «Техническая газовая динамика и основы CFD». Семестр делится на два равных модуля (периода), каждый из которых включает определённые темы.

Модуль 1 (недели 1–8) — Основы газовой динамики. Течение газа в каналах. Скачки уплотнения

Включает темы: Тема 8. Основные понятия газовой динамики. Сжимаемость газа; Тема 9. Основные уравнения газовой динамики. Уравнения неразрывности, движения и энергии; Тема 10. Скорость звука. Число Маха. Классификация течений; Тема 11. Течение газа в каналах переменного сечения. Сопла и диффузоры; Тема 12. Прямые и косые скачки уплотнения.

Модуль 2 (недели 9–16) — Основы численного моделирования (CFD). Построение сеток. Модели турбулентности

Включает темы: Тема 13. Основы численного моделирования (CFD). Уравнения Навье-Стокса; Тема 14. Построение расчётных сеток. Граничные условия; Тема 15. Модели турбулентности.

Рубежный контроль по модулям (устный опрос/собеседование)

Модуль 1. Основы газовой динамики. Течение газа в каналах. Скачки уплотнения

Перечень вопросов для собеседования:

1. Предмет газовой динамики. Отличие газов от жидкостей. Сжимаемость как основное свойство газа. Понятие об идеальном и реальном газе.
2. Параметры состояния газа: давление, плотность, температура. Уравнение состояния идеального газа. Термодинамические процессы: изохорный, изобарный, изотермический, адиабатный. Показатель адиабаты. Энтальпия и энтропия газа.
3. Роль газовой динамики в проектировании двигателей (впуск, выпуск, наддув, охлаждение).
4. Система уравнений, описывающих течение газа. Уравнение неразрывности для сжимаемой среды.
5. Уравнение движения (Эйлера). Уравнение сохранения энергии для потока газа. Связь с первым законом термодинамики.
6. Уравнение Бернулли для сжимаемого газа (при адиабатном течении). Зависимость параметров газа от скорости.
7. Физическая природа скорости звука. Вывод формулы для скорости звука в газе. Число Маха M как основной критерий подобия в газовой динамике.
8. Классификация течений: дозвуковые (M<1), околозвуковые (M≈1), сверхзвуковые (M>1), гиперзвуковые (M>>1). Влияние сжимаемости на характер течения. Понятие о критических параметрах.
9. Особенности течения газа в сужающихся и расширяющихся каналах. Зависимость скорости и давления от площади сечения.

10. Сопло Лаваля. Расчёт параметров потока в сопле Лаваля. Режимы работы сопла.

11. Диффузор. Течение газа в диффузоре. Потери в диффузорах. Применение в двигателях: впускные и выпускные каналы, сопла турбокомпрессоров, выхлопные системы.

12. Возникновение скачков уплотнения при сверхзвуковом течении. Прямой скачок уплотнения. Изменение параметров газа на прямом скачке (давление, температура, плотность, скорость). Потери полного давления на скачке.

13. Косой скачок уплотнения. Угол наклона скачка и угол поворота потока. Взаимодействие скачков уплотнения. Применение в расчётах входных устройств и выпускных систем.

Модуль 2. Основы численного моделирования (CFD). Построение сеток. Модели турбулентности

Перечень вопросов для собеседования:

1. Понятие о вычислительной гидрогазодинамике (CFD). Основные этапы CFD-анализа.

2. Полные уравнения Навье-Стокса для сжимаемого газа. Проблемы их прямого численного решения (DNS). Понятие о методе конечных объёмов. Дискретизация расчётной области.

3. Типы расчётных сеток: структурированные, неструктурированные, гибридные. Требования к качеству сетки (ортогональность, сглаживание, размер ячейки).

4. Пограничный слой и сетка вблизи стенки (y+). Задание граничных условий: на входе, на выходе, на стенках, оси симметрии, периодические условия.

5. Подготовка геометрии для расчёта (очистка, упрощение). Работа с геометрией в препроцессоре CFD-системы.

6. Роль турбулентности в технических приложениях. Осреднение по Рейнольдсу (RANS). Уравнения Рейнольдса и проблема замыкания.

7. Модели турбулентности: алгебраические, модели с одним и двумя уравнениями (k-ε, k-ω, SST).

8. Прямое численное моделирование (DNS) и моделирование крупных вихрей (LES) — краткий обзор. Критерии выбора модели турбулентности.

9. Обработка и анализ результатов CFD-расчёта (поля давления, скорости, температуры, визуализация течения).

10. Верификация и валидация расчётных моделей. Сравнение расчётных и экспериментальных данных. Оценка сходимости решения.

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). Проверяемые индикаторы: ИОПК-2.1 (понимание алгоритмов численного моделирования, используемых в CFD-пакетах).

Пример тестовых заданий (один вариант)

1. **Какой параметр характеризует сжимаемость газа?**
   - A) Число Рейнольдса
   - B) Число Маха
   - C) Число Эйлера
   - D) Число Фруда

Правильный ответ: B

2. **Какое течение называется дозвуковым?**
   - A) M < 1
   - B) M = 1
   - C) M > 1
   - D) M >> 1

Правильный ответ: A

3. **Для чего используется сопло Лаваля?**
   - A) Для увеличения давления газа
   - B) Для получения сверхзвуковых скоростей потока
   - C) Для уменьшения скорости потока
   - D) Для смешения газов

Правильный ответ: B

4. **Какой метод используется для дискретизации уравнений в CFD?**
   - A) Метод конечных элементов
   - B) Метод конечных разностей
   - C) Метод конечных объёмов
   - D) Метод граничных элементов

Правильный ответ: C

5. **Какая модель турбулентности относится к двухпараметрическим?**
   - A) Модель Смагоринского
   - B) k-ε модель
   - C) Алгебраическая модель
   - D) Модель длины пути смешения

Правильный ответ: B

Оценочные средства для индивидуального задания в рамках сквозного проекта (5 семестр)

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 элемента системы двигателя и проведением пробного CFD-моделирования. Проверяемые индикаторы: ИОПК-2.1.

Содержание индивидуального задания:

Индивидуальное задание включает в себя выполнение следующих этапов:

1. **Газодинамический расчёт элемента системы двигателя.** Студент выбирает элемент системы двигателя (впускной тракт, выпускной тракт, диффузор компрессора, сопло турбины). Выполняется расчёт параметров газового потока: определяются скорость звука, число Маха, критическое отношение давлений, рассчитываются параметры потока в характерных сечениях. Для выбранного элемента определяется форма сопла или диффузора.
2. **Анализ скачков уплотнения (при сверхзвуковом течении).** Для заданных условий на входе (при сверхзвуковом течении) рассчитываются параметры потока на прямом или косом скачке уплотнения. Определяются потери полного давления.
3. **Подготовка геометрии для CFD-расчёта.** На основе выполненных расчётов создаётся упрощённая геометрическая модель выбранного элемента (2D или осесимметричная). Выполняется очистка и упрощение геометрии для последующего построения расчётной сетки.
4. **Построение расчётной сетки.** В препроцессоре CFD-системы (при наличии доступа) или в рамках ознакомительного задания студент строит расчётную сетку для выбранной геометрии. Определяется тип сетки (структурированная/неструктурированная), задаются параметры сгущения в области пограничного слоя. Оценивается качество сетки.
5. **Настройка граничных условий и выбор модели турбулентности.** Формулируются граничные условия на входе и выходе, на стенках. Обосновывается выбор модели турбулентности для данной задачи.
6. **Анализ и верификация результатов.** Проводится пробный CFD-расчёт (при наличии доступа к программному обеспечению) или выполняется анализ гипотетических результатов. Сравниваются результаты CFD-расчёта с данными газодинамического расчёта (одномерного). Формулируются выводы о необходимости верификации модели.

Требования к оформлению:

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

- титульный лист с указанием темы задания, ФИО студента, группы, руководителя;
- содержание;
- введение с обоснованием актуальности выбранного элемента;
- основную часть, содержащую газодинамический расчёт, анализ скачков уплотнения, описание подготовки геометрии, построения сетки, выбора граничных условий и модели турбулентности, анализ результатов;
- графические материалы (схемы течения, эскизы геометрии, изображения расчётной сетки, поля давлений и скоростей — при наличии доступа к ПО);
- заключение с выводами по результатам выполненной работы;
- список использованных источников.

Примерные темы индивидуальных заданий:

1. Газодинамический расчёт и CFD-моделирование течения в сужающемся сопле впускного тракта.
2. Газодинамический расчёт и CFD-моделирование течения в сопле Лаваля выпускного тракта.
3. Газодинамический расчёт и CFD-моделирование течения в диффузоре компрессора турбокомпрессора.
4. Расчёт параметров потока на прямом скачке уплотнения в сверхзвуковом воздухозаборнике.
5. Газодинамический расчёт и CFD-моделирование течения в канале переменного сечения.
6. Анализ потерь полного давления в диффузоре впускной системы двигателя.

Оценочные средства для практических занятий (5 семестр)

Типовые задания для практических занятий

Модуль 1. Основы газовой динамики. Течение газа в каналах. Скачки уплотнения

Задание 1. Расчёт параметров газа при адиабатном течении с использованием газодинамических функций

Для заданных начальных параметров газа (давление, температура) и скорости потока (или числа Маха) определить параметры торможения (полное давление, полную температуру). Использовать газодинамические функции.

Задание 2. Расчёт скорости звука и числа Маха в различных сечениях газовоздушного тракта

Для заданных параметров потока (температура, скорость) в различных сечениях (впускной коллектор, камера сгорания, выпускной коллектор) определить скорость звука и число Маха. Сделать вывод о характере течения.

Задание 3. Расчёт параметров потока в сужающемся сопле и сопле Лаваля

Для заданных параметров газа на входе и давления на выходе определить скорость истечения, массовый расход. Выбрать форму сопла (сужающееся или сопло Лаваля). Для сопла Лаваля определить параметры в критическом сечении и на выходе.

Задание 4. Расчёт параметров диффузора впускной системы

Для заданных параметров потока на входе в диффузор и геометрических параметров диффузора определить изменение скорости и давления по длине диффузора. Оценить потери полного давления.

Задание 5. Расчёт параметров газа на прямом скачке уплотнения

Для заданных параметров набегающего сверхзвукового потока (число Маха, давление, температура) определить параметры за прямым скачком уплотнения. Рассчитать потери полного давления.

Модуль 2. Основы численного моделирования (CFD). Построение сеток. Модели турбулентности

Задание 6. Знакомство с интерфейсом CFD-пакета. Импорт геометрии

Ознакомление с интерфейсом CFD-пакета (ANSYS Fluent, OpenFOAM, Siemens Star-CCM+). Импорт геометрии из CAD-системы. Изучение основных функций препроцессора.

Задание 7. Построение расчётной сетки для простой геометрии (канал, труба)

Для заданной геометрии (прямоугольный канал, круглая труба) построить расчётную сетку. Выбрать тип сетки (структурированная). Задать параметры сетки (размер ячейки, сгущение у стенок). Оценить качество сетки (ортогональность, skewness, аспектное отношение).

Задание 8. Настройка граничных условий и выбор модели турбулентности

Для заданной задачи течения в канале задать граничные условия: скорость на входе (или расход), давление на выходе, условия на стенках. Обосновать выбор модели турбулентности (k-ε, k-ω, SST) для данной задачи.

Задание 9. Запуск расчёта и анализ результатов

Выполнить запуск расчёта (стационарного). Получить поля скоростей, давлений, температур. Построить профили скорости в характерных сечениях. Сравнить с результатами одномерного расчёта (по уравнению Бернулли или газодинамическим функциям).

Оценочные средства для курсовой работы (проекта) — 5 семестр

Курсовой проект (курсовая работа) по дисциплине в пятом семестре не предусмотрены учебным планом. Результаты освоения дисциплины используются при выполнении последующих курсовых проектов по профильным дисциплинам (Б1.1.12, Б1.1.22, Б1.2.7, Б1.2.8) и в выпускной квалификационной работе для газодинамического расчёта и CFD-моделирования элементов двигателя.

7.3.2 Промежуточная аттестация

Четвёртый семестр

Условия допуска к экзамену

Студент допускается к сдаче экзамена по итогам четвёртого семестра 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 (не менее 80% заданий выполнены и защищены).
- Выполнение и защита индивидуального задания в рамках сквозного проекта (гидравлический расчёт системы двигателя) 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). Проверяемые индикаторы: ИОПК-2.1.

Структура билета:

- **Вопрос 1** (Модуль 1): Основы гидростатики и гидродинамики (физические свойства жидкостей, законы Паскаля и Архимеда, уравнение Бернулли, режимы течения).
- **Вопрос 2** (Модуль 2): Гидравлические потери, истечение, расчёт трубопроводов (потери по длине и местные потери, истечение через отверстия и насадки, гидравлический расчёт).
- **Задание 3**: Расчётная задача (расчёт давления, потерь напора, параметров истечения, гидравлический расчёт трубопровода).

Типовые экзаменационные билеты (4 семестр)

Экзаменационный билет №1

Вопрос 1 (Модуль 1)

Уравнение Бернулли для элементарной струйки идеальной жидкости. Геометрический, физический и энергетический смысл уравнения Бернулли. Уравнение Бернулли для потока реальной жидкости. Потери напора.

Вопрос 2 (Модуль 2)

Местные гидравлические потери. Причины возникновения. Формула Вейсбаха. Коэффициенты местных сопротивлений (вход в трубу, внезапное расширение, внезапное сужение, повороты, задвижки, клапаны). Принцип сложения потерь.

Задание 3

По трубопроводу диаметром d = 50 мм и длиной L = 100 м течёт вода с расходом Q = 10 л/с. Коэффициент гидравлического трения λ = 0,03. Определить потери напора по длине. Как изменятся потери, если расход увеличится в 2 раза?

Экзаменационный билет №2

Вопрос 1 (Модуль 1)

Основное уравнение гидростатики. Закон Паскаля и его применение в гидроприводах. Абсолютное, избыточное (манометрическое) давление и вакуум. Единицы измерения давления. Давление жидкости на плоские и криволинейные поверхности.

Вопрос 2 (Модуль 2)

Истечение жидкости из малого отверстия в тонкой стенке при постоянном напоре. Скорость и расход истечения. Коэффициенты скорости, сжатия, расхода. Истечение через насадки. Применение в системах впрыска топлива.

Задание 3

Для истечения бензина из отверстия диаметром d = 5 мм в тонкой стенке при постоянном напоре H = 2 м определить скорость истечения и расход. Коэффициент скорости φ = 0,97, коэффициент расхода μ = 0,62. Плотность бензина ρ = 750 кг/м³.

Экзаменационный билет №3

Вопрос 1 (Модуль 1)

Режимы движения жидкости. Опыты Рейнольдса. Ламинарный и турбулентный режимы течения. Критерий Рейнольдса (число Рейнольдса). Критическое число Рейнольдса. Распределение скоростей по сечению потока при ламинарном и турбулентном течении.

Вопрос 2 (Модуль 2)

Классификация трубопроводов (простые и сложные, короткие и длинные). Последовательное и параллельное соединение трубопроводов. Расчёт потребного напора. Построение характеристики сети.

Задание 3

Для системы смазки двигателя масляный насос подаёт масло с расходом Q = 2 л/с по трубопроводу длиной L = 5 м и диаметром d = 30 мм. Вязкость масла ν = 0,5·10⁻⁴ м²/с, плотность ρ = 900 кг/м³. Определить режим течения (число Рейнольдса) и потери напора по длине. Коэффициент гидравлического трения принять λ = 0,04.

Полный перечень теоретических вопросов к экзамену по каждой теме (4 семестр)

Модуль 1. Основы гидростатики и гидродинамики

1. Предмет и задачи гидравлики. Роль дисциплины в проектировании и верификации двигателей.
2. Жидкость как сплошная среда. Основные физические свойства жидкостей: плотность, удельный вес, сжимаемость, температурное расширение, вязкость (динамическая и кинематическая).
3. Ньютоновские и неньютоновские жидкости. Идеальная и реальная жидкости. Силы, действующие в жидкости: массовые и поверхностные.
4. Гидростатическое давление и его свойства. Основное уравнение гидростатики.
5. Закон Паскаля и его применение в гидроприводах. Абсолютное, избыточное (манометрическое) давление и вакуум. Единицы измерения давления.
6. Давление жидкости на плоские и криволинейные поверхности. Эпюры давления.
7. Закон Архимеда. Условия плавания тел. Применение гидростатики в расчётах систем питания и смазки двигателя.
8. Методы описания движения жидкости: метод Лагранжа и метод Эйлера. Установившееся и неустановившееся движение.
9. Линии тока, трубка тока, элементарная струйка. Расход жидкости (объёмный и массовый).
10. Уравнение неразрывности (сплошности) для потока жидкости.
11. Уравнение Бернулли для элементарной струйки идеальной жидкости. Геометрический, физический и энергетический смысл уравнения Бернулли.
12. Уравнение Бернулли для потока реальной жидкости. Потери напора.

13. Практическое применение уравнения Бернулли (водомер Вентури, трубка Пито).

14. Опыты Рейнольдса. Ламинарный и турбулентный режимы течения. Критерий Рейнольдса (число Рейнольдса).

15. Критическое число Рейнольдса. Распределение скоростей по сечению потока при ламинарном и турбулентном течении.

16. Касательные напряжения при ламинарном и турбулентном течении. Турбулентная вязкость.

17. Понятие о гидродинамически гладких и шероховатых трубах.

Модуль 2. Гидравлические потери. Истечение. Расчёт трубопроводов

18. Причины гидравлических потерь. Общие понятия о потерях напора. Потери напора по длине (линейные потери) при ламинарном и турбулентном течении.

19. Формула Дарси-Вейсбаха. Коэффициент гидравлического трения λ.

20. Формулы для расчёта λ (Пуазейля, Блазиуса, Альтшуля, Никурадзе, Мурина).

21. Местные гидравлические потери. Причины возникновения. Формула Вейсбаха.

22. Коэффициенты местных сопротивлений (вход в трубу, внезапное расширение, внезапное сужение, повороты, задвижки, клапаны).

23. Принцип сложения потерь. Гидравлический расчёт трубопроводов.

24. Истечение жидкости из малого отверстия в тонкой стенке при постоянном напоре. Скорость и расход истечения.

25. Коэффициенты скорости, сжатия, расхода. Истечение через насадки (цилиндрические, конические, коноидальные).

26. Сравнение расхода через отверстие и насадки. Применение в системах впрыска топлива (форсунки).

27. Классификация трубопроводов (простые и сложные, короткие и длинные). Последовательное и параллельное соединение трубопроводов.

28. Разомкнутые и кольцевые сети. Расчёт потребного напора. Построение характеристики сети.

29. Гидравлический удар в трубах. Основы расчёта гидравлических систем двигателя (системы смазки, охлаждения, топливоподачи).

Пятый семестр

Условия допуска к экзамену

Студент допускается к сдаче экзамена по итогам пятого семестра 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 (не менее 80% заданий выполнены и защищены).
- Выполнение и защита индивидуального задания в рамках сквозного проекта (газодинамический расчёт и основы CFD) 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 результатов CFD-расчёта). Проверяемые индикаторы: ИОПК-2.1.

Структура билета:

- **Вопрос 1** (Модуль 1): Основы газовой динамики, течение газа в каналах, скачки уплотнения.
- **Вопрос 2** (Модуль 2): Основы численного моделирования (CFD), построение сеток, модели турбулентности.
- **Задание 3**: Расчётная задача (расчёт параметров потока в сопле, расчёт скачка уплотнения) или анализ гипотетических результатов CFD-расчёта.

Типовые экзаменационные билеты (5 семестр)

Экзаменационный билет №1

Вопрос 1 (Модуль 1)

Течение газа в каналах переменного сечения. Сопло Лаваля. Расчёт параметров потока в сопле Лаваля. Режимы работы сопла. Применение в двигателях (впускные и выпускные каналы, сопла турбокомпрессоров).

Вопрос 2 (Модуль 2)

Основы численного моделирования (CFD). Основные этапы CFD-анализа. Типы расчётных сеток (структурированные, неструктурированные, гибридные). Требования к качеству сетки. Пограничный слой и сетка вблизи стенки (y+).

Задание 3

Для сужающегося сопла с входным диаметром D1 = 100 мм, выходным диаметром D2 = 50 мм определить скорость истечения воздуха при давлении на входе p1 = 0,5 МПа, температуре T1 = 400 К, давлении на выходе p2 = 0,1 МПа. Показатель адиабаты k = 1,4, газовая постоянная R = 287 Дж/(кг·К). Определить режим истечения.

Экзаменационный билет №2

Вопрос 1 (Модуль 1)

Скорость звука. Число Маха. Классификация течений: дозвуковые, околозвуковые, сверхзвуковые, гиперзвуковые. Влияние сжимаемости на характер течения. Критические параметры.

Вопрос 2 (Модуль 2)

Модели турбулентности. Осреднение по Рейнольдсу (RANS). Уравнения Рейнольдса и проблема замыкания. Модели турбулентности: k-ε, k-ω, SST. Критерии выбора модели турбулентности.

Задание 3

Набегающий сверхзвуковой поток воздуха имеет число Маха M1 = 2, давление p1 = 0,05 МПа, температуру T1 = 250 К. Определить параметры потока за прямым скачком уплотнения (M2, p2, T2). Показатель адиабаты k = 1,4.

Экзаменационный билет №3

Вопрос 1 (Модуль 1)

Прямой скачок уплотнения. Изменение параметров газа на прямом скачке (давление, температура, плотность, скорость). Потери полного давления на скачке. Косой скачок уплотнения. Угол наклона скачка и угол поворота потока.

Вопрос 2 (Модуль 2)

Обработка и анализ результатов CFD-расчёта (поля давления, скорости, температуры, визуализация течения). Верификация и валидация расчётных моделей. Сравнение расчётных и экспериментальных данных. Оценка сходимости решения.

Задание 3

Для течения воздуха в канале с внезапным расширением заданы: скорость на входе V1 = 100 м/с, давление p1 = 0,2 МПа, температура T1 = 300 К, отношение площадей A2/A1 = 2. Используя уравнение неразрывности и уравнение Бернулли для сжимаемого газа (приближённо), определить скорость на выходе V2 и изменение давления. Сравнить с идеальным случаем (без потерь).

Полный перечень теоретических вопросов к экзамену по каждой теме (5 семестр)

Модуль 1. Основы газовой динамики. Течение газа в каналах. Скачки уплотнения

1. Предмет газовой динамики. Отличие газов от жидкостей. Сжимаемость как основное свойство газа. Понятие об идеальном и реальном газе.
2. Параметры состояния газа: давление, плотность, температура. Уравнение состояния идеального газа.
3. Термодинамические процессы: изохорный, изобарный, изотермический, адиабатный. Показатель адиабаты. Энтальпия и энтропия газа.
4. Роль газовой динамики в проектировании двигателей (впуск, выпуск, наддув, охлаждение).

5. Система уравнений, описывающих течение газа. Уравнение неразрывности для сжимаемой среды.

6. Уравнение движения (Эйлера). Уравнение сохранения энергии для потока газа.

7. Уравнение Бернулли для сжимаемого газа (при адиабатном течении). Зависимость параметров газа от скорости.

8. Физическая природа скорости звука. Вывод формулы для скорости звука в газе.

9. Число Маха M как основной критерий подобия в газовой динамике.

10. Классификация течений: дозвуковые (M<1), околозвуковые (M≈1), сверхзвуковые (M>1), гиперзвуковые (M>>1). Влияние сжимаемости на характер течения.

11. Понятие о критических параметрах. Особенности течения газа в сужающихся и расширяющихся каналах.

12. Зависимость скорости и давления от площади сечения. Сопло Лаваля.

13. Расчёт параметров потока в сопле Лаваля. Режимы работы сопла.

14. Диффузор. Течение газа в диффузоре. Потери в диффузорах.

15. Применение в двигателях: впускные и выпускные каналы, сопла турбокомпрессоров, выхлопные системы.

16. Возникновение скачков уплотнения при сверхзвуковом течении.

17. Прямой скачок уплотнения. Изменение параметров газа на прямом скачке (давление, температура, плотность, скорость). Потери полного давления на скачке.

18. Косой скачок уплотнения. Угол наклона скачка и угол поворота потока. Взаимодействие скачков уплотнения.

19. Применение в расчётах входных устройств и выпускных систем.

Модуль 2. Основы численного моделирования (CFD). Построение сеток. Модели турбулентности

20. Понятие о вычислительной гидрогазодинамике (CFD). Основные этапы CFD-анализа.

21. Полные уравнения Навье-Стокса для сжимаемого газа. Проблемы их прямого численного решения (DNS).

22. Понятие о методе конечных объёмов. Дискретизация расчётной области.

23. Типы расчётных сеток: структурированные, неструктурированные, гибридные. Требования к качеству сетки (ортогональность, сглаживание, размер ячейки).

24. Пограничный слой и сетка вблизи стенки (y+). Задание граничных условий: на входе, на выходе, на стенках, оси симметрии, периодические условия.

25. Подготовка геометрии для расчёта (очистка, упрощение). Работа с геометрией в препроцессоре CFD-системы.

26. Роль турбулентности в технических приложениях. Осреднение по Рейнольдсу (RANS). Уравнения Рейнольдса и проблема замыкания.

27. Модели турбулентности: алгебраические, модели с одним и двумя уравнениями (k-ε, k-ω, SST).

28. Прямое численное моделирование (DNS) и моделирование крупных вихрей (LES) — краткий обзор. Критерии выбора модели турбулентности.

29. Обработка и анализ результатов CFD-расчёта (поля давления, скорости, температуры, визуализация течения).

30. Верификация и валидация расчётных моделей. Сравнение расчётных и экспериментальных данных. Оценка сходимости решения.