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

РАСЧЕТ И ОПТИМИЗАЦИЯ ДЕТАЛЕЙ ДВИГАТЕЛЯ

Направление подготовки/ специальность
13.03.03 «Энергетическое машиностроение»

Профиль/ специализация
Поршневые двигатели и турбомашины

Квалификация
Бакалавр

Форма обучения
Очная

Москва, 2026

Разработчик(и):
к.т.н., доцент  /Р.И. Рахматов/

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

Оглавление

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

1 Цели, задачи и планируемые результаты обучения по дисциплине

Целью освоения дисциплины является формирование у обучающихся углубленных знаний и практических навыков в области проектирования, расчёта и оптимизации элементов конструкции поршневых двигателей и турбомашин с применением метода конечных элементов (МКЭ) для точного и надёжного анализа поведения деталей под воздействием различных нагрузок, температурных воздействий и других эксплуатационных факторов на третьем этапе сквозного проектирования «Расчётное обоснование, верификация и оптимизация».

Задачами дисциплины являются:

– изучение теоретических основ метода конечных элементов и его реализации в современных CAE-системах;

– освоение методик построения расчётных конечно-элементных моделей деталей двигателя, включая создание качественных сеток и задание граничных условий;

– формирование навыков проведения прочностного анализа деталей двигателя при статических и циклических нагрузках с определением напряжённо-деформированного состояния;

– изучение методов теплового расчёта и анализа теплового состояния теплонапряжённых деталей (поршня, головки цилиндров, клапанов) с учётом сопряжённого теплообмена;

– приобретение навыков выполнения модального анализа для определения собственных частот и форм колебаний деталей и узлов;

– освоение методов optimisation (топологической, параметрической, размерной) для снижения массы деталей при обеспечении заданных критериев прочности и жёсткости;

– формирование умения верифицировать результаты расчётов, оценивать их достоверность и корректность принятых допущений;

– изучение подходов к анализу усталостной долговечности деталей, работающих в условиях циклического нагружения.

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

Планируемые результаты обучения по дисциплине

Код и наименование компетенции	Код и наименование индикатора достижения компетенции
ПК-2. Способен проводить расчетно-теоретические исследования узлов и систем поршневых двигателей и турбомашин с применением методов математического и компьютерного моделирования (CAE)	**ИПК-2.1.** Способен проводить комбинированный термомеханический анализ детали, работающей в условиях высоких температур и механических нагрузок
	ИПК-2.2. Способен выполнять анализ усталостной долговечности детали при циклическом нагружении
	ИПК-2.3. Способен осуществлять параметрическую и топологическую оптимизацию детали для минимизации массы при соблюдении заданных ограничений по прочности, жёсткости и частоте собственных колебаний
	ИПК-2.7. Способен выполнять верифицированный прочностной расчёт ответственной детали КШМ в CAE-среде на основе ранее рассчитанных динамических нагрузок

Код и наименование компетенции	Код и наименование индикатора достижения компетенции
	ИПК-2.8. Способен проводить расчёт и анализ теплового состояния теплонапряжённого узла с применением методов сопряжённого теплообмена

Роль дисциплины в формировании компетенций:

Формирующая. Дисциплина обеспечивает практическое освоение методов конечно-элементного анализа (МКЭ) для расчёта и оптимизации деталей двигателя. Студенты осваивают полный цикл CAE-анализа: подготовку геометрических моделей (упрощение, декомпозиция), построение расчётных сеток, задание граничных условий и нагрузок (включая данные динамического и теплового расчётов), решение и интерпретацию результатов. В ходе лабораторных работ формируются навыки проведения комбинированного термомеханического анализа деталей, работающих в условиях высоких температур и механических нагрузок (поршень, клапан, головка блока) (ИПК-2.1); анализа усталостной долговечности при циклическом нагружении (коленчатый вал, шатун) (ИПК-2.2); параметрической и топологической оптимизации для снижения массы при сохранении прочности и жёсткости (ИПК-2.3); верифицированного прочностного расчёта деталей КШМ на основе динамических нагрузок (ИПК-2.7); расчёта теплового состояния теплонапряжённых узлов с применением методов сопряжённого теплообмена (ИПК-2.8).

2 Место дисциплины в структуре образовательной программы

Дисциплина **«Расчет и оптимизация деталей двигателя»** относится к **части блока Б.1, формируемой участниками образовательных отношений** учебного плана (код дисциплины: Б1.2.9) и изучается в **6-м семестре**.

Данная дисциплина является **углублённым курсом третьего этапа сквозного проекта «Расчётное обоснование, верификация и оптимизация»**, обеспечивая освоение современных методов компьютерного инжиниринга (CAE) для детального анализа и оптимизации конструкций, разработанных в рамках предшествующих дисциплин.

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

- **Инженерная механика в энергетическом машиностроении** (Б1.1.16, 3 семестр): знание законов статики, кинематики и динамики необходимо для понимания характера нагружения деталей.
- **Сопротивление материалов** (Б1.1.15, 3-4 семестры): знание основ теории упругости, методов расчёта на прочность и жёсткость является фундаментом для понимания результатов МКЭ-анализа.
- **Термодинамика** (Б1.1.17, 3 семестр) и **Теория рабочих процессов поршневых двигателей** (Б1.1.20, 4 семестр): знание тепловых процессов необходимо для задания тепловых граничных условий при термомеханическом анализе.
- **Конструкция поршневых двигателей** (Б1.2.2, 2 семестр) и **Конструирование и расчет механизмов энергетических установок** (Б1.1.22, 5-6 семестры): понимание конструкции и принципов работы деталей и узлов необходимо для корректной постановки расчётных задач.
- **Конструкционные материалы поршневых двигателей и турбомашин** (Б1.1.13, 3 семестр): знание свойств материалов необходимо для задания физико-механических характеристик в расчётных моделях.

- **Информатика** (школьный курс) и **Технологии искусственного интеллекта** (Б1.1.5, 1 семестр): владение компьютером и понимание основ алгоритмизации необходимо для работы в CAE-системах.
- **Автоматизированное проектирование в двигателестроении** (Б1.1.12, 2-3 семестры): владение CAD-системами необходимо для создания или импорта геометрических моделей для расчёта.
- **Динамический расчет поршневых двигателей** (Б1.2.4, 5 семестр): знание динамических нагрузок, действующих на детали КШМ, необходимо для задания граничных условий.
- **Конструирование и расчет поршневых двигателей** (Б1.2.8, 6 семестр), изучаемое параллельно, даёт знания о конструктивных решениях, которые подвергаются расчётному анализу и оптимизации.

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:

- **Методы испытаний поршневых двигателей и турбомашин** (Б1.2.14, 7 семестр): результаты расчётного анализа могут быть верифицированы экспериментально (IV этап).
- **Разработка конструкторской документации на двигатели и их компоненты** (Б1.2.15, 7 семестр): оптимизированные конструкции оформляются в виде комплекта КД (IV этап).
- **Технологическая подготовка производства в машиностроении** (Б1.2.16, 7 семестр): оптимизированные конструкции должны быть технологичны в изготовлении (IV этап).
- **Виброакустика на транспорте** (Б1.2.11, 7 семестр) и **Снижение шума и вибрации автотранспортных средств** (Б1.2.10, 6 семестр): результаты модального анализа используются для оценки виброакустических характеристик.
- Подготовка и защита выпускной квалификационной работы, где результаты расчётов и оптимизации могут быть представлены как часть проекта.

3. Структура и содержание дисциплины

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

3.1. Виды учебной работы и трудоемкость

№ п/п	Вид учебной работы	Количество часов	Семестры
			6
1	**Аудиторные занятия**	**72**	**72**
	В том числе:		
1.1	Лекции	18	18
1.2	Семинарские/практические занятия	18	18
1.3	Лабораторные занятия	36	36
2	**Самостоятельная работа**	**108**	**108**
3	**Промежуточная аттестация**		

№ п/п	Вид учебной работы	Количество часов	Семестры
	Экзамен	Экзамен	Экзамен
	Итого	**180**	**180**

3.2. Тематический план изучения дисциплины

№ п/п	Название раздела / темы	Всего часов	Аудиторная работа	Лекции	Семинарские/ практические занятия	Лабораторные занятия	Самостоятельная работа
Семестр 6	**Расчет и оптимизация деталей двигателя**						
1	Тема 1. Введение в CAE-анализ. Основы метода конечных элементов (МКЭ)	16	6	2	2	4	6
2	Тема 2. Подготовка геометрических моделей для расчёта	14	8	2	2	4	8
3	Тема 3. Построение конечно-элементной сетки	16	8	2	2	4	8
4	Тема 4. Задание граничных условий и нагрузок	16	8	2	2	4	8
5	Тема 5. Прочностной анализ деталей КШМ (поршень, шатун, коленчатый вал)	26	12	2	4	6	14

№ п/п	Название раздела / темы	Всего часов	Аудиторная работа	Лекции	Семинарские/ практические занятия	Лабораторные занятия	Самостоятельная работа
6	Тема 6. Тепловой анализ и сопряжённый теплообмен	22	8	2	2	4	14
7	Тема 7. Усталостный анализ (Fatigue)	22	8	2	2	4	14
8	Тема 8. Топологическая и параметрическая оптимизация	22	8	2	2	4	14
9	Тема 9. Анализ и интерпретация результатов. Верификация моделей	22	6	2	–	4	16
	Итого за 1 семестр	**144**	**72**	**18**	**18**	**36**	**108**

3.3. Содержание дисциплины

Семестр 6. Расчет и оптимизация деталей двигателя

Тема 1. Введение в CAE-анализ. Основы метода конечных элементов (МКЭ)

Роль инженерного анализа (CAE) в современном проектировании. Место дисциплины в сквозном проекте: верификация и оптимизация конструкций. Основные этапы CAE-анализа. Физические основы МКЭ: дискретизация сплошной среды, виды конечных элементов (1D, 2D, 3D). Понятие о функциях формы, узловых перемещениях, матрице жёсткости. Обзор современных CAE-пакетов (ANSYS Workbench, APM WinMachine, OpenFOAM и др.). Интерфейс программного комплекса, типы анализа.

Тема 2. Подготовка геометрических моделей для расчёта

Требования к геометрическим моделям для конечно-элементного анализа. Импорт геометрии из CAD-систем (форматы STEP, IGES, Parasolid). Очистка и упрощение геометрии: удаление мелких элементов (фасок, скруглений, отверстий), не влияющих на напряжённо-деформированное состояние. Декомпозиция сложной геометрии на простые объёмы для построения качественной сетки. Создание расчётных сечений. Подготовка модели для сопряжённого теплообмена. Работа с геометрией в препроцессоре CAE-системы (DesignModeler, SpaceClaim).

Тема 3. Построение конечно-элементной сетки

Типы конечных элементов: стержневые, пластинчатые, объёмные (тетраэдры, гексаэдры). Влияние типа элемента на точность расчёта. Методы построения сетки: автоматическая, структурированная (hex-dominant), гибридная. Параметры сетки: размер элемента, сгущение в зонах концентрации напряжений. Понятие о качестве сетки: ортогональность, skewness, аспектное отношение. Построение пограничного слоя (inflation) для задач теплообмена и гидродинамики. Проверка качества построенной сетки и её адаптация. Ручное управление параметрами сетки.

Тема 4. Задание граничных условий и нагрузок

Типы граничных условий: закрепления (жесткая заделка, шарнирное опирание, цилиндрическая опора, трение), симметрия, антисимметрия. Задание нагрузок: силы, давление, моменты, гидростатическое давление, тепловые нагрузки (температура, тепловой поток, конвекция). Способы приложения нагрузок к модели (к вершинам, рёбрам, граням, телам). Учёт инерционных нагрузок (центробежные силы). Задание контактных взаимодействий (склейка, трение, без разделения). Использование результатов динамического расчёта в качестве граничных условий.

Тема 5. Прочностной анализ деталей КШМ (поршень, шатун, коленчатый вал)

Особенности расчёта поршня: задание давления газов на днище, сил инерции, температурных нагрузок. Учёт контакта поршня с гильзой и поршневого пальца. Определение напряжённо-деформированного состояния поршня. Особенности расчёта шатуна: задание сил в верхней и нижней головках, учёт запрессованной втулки. Расчёт стержня шатуна на устойчивость. Определение запасов прочности. Особенности расчёта коленчатого вала: задание нагрузок от шатунов, учёт центробежных сил. Определение напряжений в галтелях и масляных отверстиях. Расчёт запасов прочности. Построение эпюр напряжений.

Тема 6. Тепловой анализ и сопряжённый теплообмен

Основы теплопередачи: теплопроводность, конвекция, тепловое излучение. Постановка задач теплового анализа. Граничные условия теплового анализа: задание температуры, теплового потока, коэффициента теплоотдачи и температуры среды. Определение температурных полей в деталях двигателя (поршень, головка блока, клапан, гильза). Учёт тепловых напряжений. Сопряжённый теплообмен (CHT): одновременный расчёт течения жидкости/газа и теплопередачи в твёрдом теле.

Тема 7. Усталостный анализ (Fatigue)

Основы теории усталостной прочности. Циклические нагрузки. Кривая усталости (SN-кривая). Предел выносливости. Влияние концентраторов напряжений, качества обработки поверхности, масштабного фактора на предел выносливости. Методы суммирования усталостных повреждений. Проведение усталостного анализа в CAE-системах. Задание циклических нагрузок. Определение ресурса (долговечности) детали. Анализ запасов прочности при циклических нагрузках.

Тема 8. Топологическая и параметрическая оптимизация

Цели оптимизации конструкции: снижение массы, обеспечение заданной прочности и жёсткости. Параметрическая оптимизация: варьирование размеров (параметров) модели для достижения целевой функции. Топологическая оптимизация: определение оптимального распределения материала в заданной расчётной области при заданных нагрузках и ограничениях. Постановка задачи оптимизации: целевая функция, проектные переменные, ограничения. Проведение топологической оптимизации детали (шатуна, поршня, кронштейна). Интерпретация результатов оптимизации и реконструкция геометрии.

Тема 9. Анализ и интерпретация результатов. Верификация моделей

Методы визуализации результатов: поля напряжений, деформаций, температур, запасов прочности. Построение графиков, сечений. Анализ сходимости решения. Оценка достоверности полученных результатов. Сравнение с аналитическими решениями (для тестовых задач). Верификация расчётных моделей с помощью экспериментальных данных (тензометрия, термометрия). Оформление отчёта по результатам CAE-анализа. Формулировка выводов и рекомендаций по изменению конструкции.

3.4. Тематика семинарских/практических и лабораторных занятий

3.4.1. Семинарские/практические занятия

№ п/п	№ раздела дисциплины	Наименование практического занятия	Трудоемкость (час.)
1	Тема 1	Обзор интерфейса CAE-пакета. Типы анализа. Создание проекта	2
2	Тема 2	Импорт и упрощение геометрической модели поршня для расчёта	2
3	Тема 3	Построение и контроль качества сетки для модели поршня	2
4	Тема 4	Задание граничных условий и нагрузок для модели поршня	2
5	Тема 5	Расчёт и анализ НДС поршня	2
6	Тема 6	Постановка задачи теплового анализа поршня. Задание граничных условий	2
7	Тема 7	Настройка параметров усталостного анализа	2
8	Тема 8	Постановка задачи топологической оптимизации для шатуна	2
9	Тема 9	Анализ и интерпретация результатов. Оформление отчёта	2
	Итого		**18**

3.4.2. Лабораторные занятия

№ п/п	№ раздела дисциплины	Наименование лабораторной работы	Трудоемкость (час.)
1	Тема 1	Статический анализ простой детали (балка, пластина) с известным аналитическим решением	4
2	Тема 2-3	Импорт геометрии, упрощение и построение сетки для модели поршня	4
3	Тема 4-5	Прочностной анализ поршня на режиме номинальной мощности	4
4	Тема 4-5	Прочностной анализ шатуна на режиме максимальной нагрузки	4
5	Тема 4-5	Прочностной анализ коленчатого вала (фрагмента)	4
6	Тема 6	Тепловой анализ поршня (определение температурных полей)	4

№ п/п	№ раздела дисциплины	Наименование лабораторной работы	Трудоемкость (час.)
7	Тема 7	Усталостный анализ коленчатого вала	4
8	Тема 8	Топологическая оптимизация шатуна для снижения массы	4
9	Тема 9	Комплексный анализ детали по индивидуальному заданию	4
	Итого		**36**

3.5. Тематика курсовых проектов (курсовых работ)

Курсовой проект (курсовая работа) по дисциплине не предусмотрены. Однако результаты освоения дисциплины (навыки CAE-анализа и оптимизации) используются при выполнении последующих курсовых проектов по дисциплине «Конструирование и расчет поршневых двигателей», а также в выпускной квалификационной работе для обоснования прочности и оптимизации конструкции разрабатываемого узла.

4. Учебно-методическое и информационное обеспечение

4.1. Нормативные документы и ГОСТы

1. ГОСТ 25.101-83 «Расчёты и испытания на прочность. Методы расчёта и испытаний на усталостную прочность»
2. ГОСТ 25.503-97 «Расчёты и испытания на прочность. Методы испытаний на статическую прочность»
3. ГОСТ 25.504-82 «Расчёты и испытания на прочность. Методы расчёта на прочность лопаток паровых и газовых турбин»
4. ГОСТ 25.506-85 «Расчёты и испытания на прочность. Методы расчёта и испытаний на вибропрочность»
5. ГОСТ 2.102-2013 «Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Виды и комплектность конструкторских документов»
6. ГОСТ 2.105-95 «Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Общие требования к текстовым документам»

4.2. Основная литература

1. Копылов, Ю. Р. Основы компьютерных цифровых технологий машиностроения : учебник / Ю. Р. Копылов. — Санкт-Петербург : Лань, 2022. — 496 с. — ISBN 978-5-8114-3913-3. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: https://e.lanbook.com/book/207086
2. Совертков, П. И. Компьютерное моделирование / П. И. Совертков. — Санкт-Петербург : Лань, 2023. — 424 с. — ISBN 978-5-507-46708-2. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: https://e.lanbook.com/book/339761

4.3. Дополнительная литература

1. Чуешев, А. В. Компьютерное проектирование процессов : учебно-методическое пособие / А. В. Чуешев. — Кемерово : КемГУ, 2024. — 255 с. — ISBN 978-5-8353-3159-8. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: https://e.lanbook.com/book/451796

2. Александрина, Н. А. Компьютерное моделирование : учебное пособие / Н. А. Александрина. — 2-е изд., переработанное. — Волгоград : Волгоградский ГАУ, 2021. — 128 с. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: https://e.lanbook.com/book/247436
3. Коровина, Ю. В. Компьютерное моделирование : учебное пособие / Ю. В. Коровина. — Новокузнецк : КГПИ КемГУ, 2019. — 96 с. — ISBN 978-5-8353-1374-7. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: https://e.lanbook.com/book/169605

4.4. Электронные образовательные ресурсы

Компьютерное проектирование и моделирование энергоустановок
https://online.mospolytech.ru/user/index.php?id=15830

4.5. Лицензионное и свободно распространяемое программное обеспечение

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

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

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

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

4.6. Современные профессиональные базы данных и информационные справочные системы

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

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

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

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

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

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

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

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

5. Материально-техническое обеспечение

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

Наименование специальных помещений	**Оснащённость специальных помещений**
Аудитория для лекционных, семинарских и практических занятий № Нд-222 107023, г. Москва, ул. Б. Семёновская, д. 38, стр.13	Комплект мебели для учебного процесса. Мультимедийное оборудование: интерактивная электронная доска, экран для проектора, переносной ноутбук, проектор. Возможность доступа в интернет.
Аудитория для лекционных, семинарских и практических занятий № Нд-223 107023, г. Москва, ул. Б. Семёновская, д. 38, стр.13	Комплект мебели для учебного процесса. Мультимедийное оборудование: интерактивная электронная доска, переносной ноутбук. Возможность доступа в интернет.
Компьютерный класс № Нд-224 107023, г. Москва, ул. Б. Семёновская, д. 38, стр.13	Компьютеры и мебель для учебного процесса. Мультимедийное оборудование: интерактивная электронная доска, переносной ноутбук. Возможность доступа в интернет.
Аудитория для лекционных, семинарских и практических занятий № Нд-229 107023, г. Москва, ул. Б. Семёновская, д. 38, стр.13	Комплект мебели для учебного процесса. Мультимедийное оборудование: интерактивная электронная доска, переносной ноутбук. Возможность доступа в интернет.
Аудитория для лекционных, семинарских и практических занятий № Н-406 107023, г. Москва, ул. Б. Семёновская, д. 38, стр.13	Комплект мебели для учебного процесса. Мультимедийное оборудование: интерактивная электронная доска, экран для проектора, переносной ноутбук, проектор. Возможность доступа в интернет.

6. Методические рекомендации

6.1. Методические рекомендации для преподавателя по организации обучения

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

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

Перед началом преподавания преподавателю необходимо:

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

В ходе лекционного занятия преподаватель должен:

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

При проведении практических (семинарских) занятий рекомендуется:

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

При проведении лабораторных занятий (при наличии) рекомендуется:

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

При организации самостоятельной работы студентов следует:

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

При проведении текущего контроля и промежуточной аттестации рекомендуется:

- использовать разнообразные формы контроля в соответствии с фондом оценочных средств;
- обеспечить объективность оценивания, руководствуясь установленными критериями;
- своевременно доводить результаты до студентов с указанием ошибок и рекомендаций.

В целях повышения эффективности образовательного процесса рекомендуется использовать:

- мультимедийные презентации для визуализации материала;
- интерактивные методы обучения (деловые игры, дискуссии, разбор кейсов);
- дистанционные образовательные технологии;
- материалы, размещённые в системе дистанционного обучения Московского Политеха (СДО-LMS).

6.2. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины\

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

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

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

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

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

Для успешного освоения дисциплины рекомендуется:

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

При подготовке к текущему контролю и промежуточной аттестации рекомендуется:

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

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

7. Фонд оценочных средств

7.1 Методы контроля и оценивания результатов обучения

Сформированность компетенций при изучении дисциплины определяется посредством оценки соответствия ответов и/или выполнения заданий заявленным индикаторам в рамках мероприятий текущего контроля и промежуточной аттестации (экзамена). Дисциплина «Расчет и оптимизация деталей двигателя» является формирующей для компетенции ПК-2, обеспечивая углублённые знания и практические навыки в области проектирования, расчёта и оптимизации элементов конструкции поршневых двигателей и турбомашин с применением метода конечных элементов (МКЭ) для точного и надёжного анализа поведения деталей под воздействием различных нагрузок, температурных воздействий и других эксплуатационных факторов на третьем этапе сквозного проектирования «Расчётное обоснование, верификация и оптимизация».

В процессе изучения дисциплины оценивается сформированность следующих компетенций и индикаторов:

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

Индикаторы достижения компетенции:

- **ИПК-2.1.** Способен проводить комбинированный термомеханический анализ детали, работающей в условиях высоких температур и механических нагрузок.
- **ИПК-2.2.** Способен выполнять анализ усталостной долговечности детали при циклическом нагружении, учитывая реальный спектр нагрузок.

• **ИПК-2.3.** Способен осуществлять параметрическую и топологическую оптимизацию детали для минимизации массы при соблюдении заданных ограничений по прочности, жёсткости и частоте собственных колебаний.

• **ИПК-2.7.** Способен выполнять верифицированный прочностной расчёт ответственной детали КШМ в CAE-среде на основе ранее рассчитанных динамических нагрузок.

• **ИПК-2.8.** Способен проводить расчёт и анализ теплового состояния теплонапряжённого узла с применением методов сопряжённого теплообмена.

Дисциплина «Расчет и оптимизация деталей двигателя» является углублённым курсом третьего этапа сквозного проекта «Расчётное обоснование, верификация и оптимизация», обеспечивая освоение современных методов компьютерного инжиниринга (CAE) для детального анализа и оптимизации конструкций, разработанных в рамках предшествующих дисциплин. В ходе изучения дисциплины студент осваивает теоретические основы метода конечных элементов, методики построения расчётных конечно-элементных моделей, методы проведения прочностного, теплового, усталостного анализа, а также методы топологической и параметрической оптимизации.

В процессе изучения дисциплины используются следующие методы контроля.

Текущее (рубежное) тестирование по модулям

Проводится после завершения изучения каждого из двух модулей дисциплины. Тестирование осуществляется в письменной или компьютерной форме и включает вопросы закрытого и открытого типа, а также расчётные задачи, направленные на проверку знаний теоретических основ МКЭ, методов построения расчётных сеток, задания граничных условий, проведения прочностного, теплового, усталостного анализа, методов оптимизации. Результаты тестирования используются для оценки уровня освоения материала модуля и определения готовности студента к дальнейшему обучению. Проверяемые индикаторы: ИПК-2.1, ИПК-2.2, ИПК-2.3, ИПК-2.7, ИПК-2.8.

Устный опрос (собеседование)

Проводится в ходе практических и лабораторных занятий для проверки понимания студентом теоретического материала, способности аргументированно излагать принципы МКЭ, объяснять выбор типа конечных элементов, обосновывать граничные условия, интерпретировать результаты расчёта, анализировать эффективность оптимизации. Устный опрос может быть как индивидуальным, так и фронтальным, и направлен на выявление глубины усвоения материала, умения применять полученные знания для решения профессиональных задач. В рамках сквозного проекта устный опрос позволяет оценить способность студента выполнять CAE-анализ и оптимизацию деталей проектируемого двигателя. Проверяемые индикаторы: ИПК-2.1, ИПК-2.2, ИПК-2.3, ИПК-2.7, ИПК-2.8.

Практические занятия

В ходе выполнения практических заданий (обзор интерфейса CAE-пакета, импорт и упрощение геометрической модели, построение и контроль качества сетки, задание граничных условий и нагрузок, расчёт и анализ НДС, постановка задачи теплового анализа, настройка параметров усталостного анализа, постановка задачи топологической оптимизации, анализ и интерпретация результатов) 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 CAE-анализа и оптимизации, необходимых для выполнения третьего этапа сквозного проекта. Проверяемые индикаторы: ИПК-2.1, ИПК-2.2, ИПК-2.3, ИПК-2.7, ИПК-2.8.

Лабораторные занятия

В ходе выполнения лабораторных работ студент работает с CAE-системами (ANSYS Workbench, APM WinMachine и др.). Проводятся работы по статическому анализу простой детали с известным аналитическим решением, импорту геометрии и построению сетки для модели поршня, прочностному анализу поршня, шатуна, коленчатого вала, тепловому анализу поршня, усталостному анализу коленчатого вала, топологической оптимизации шатуна. Оценивается умение работать с CAE-системами, строить расчётные модели, задавать граничные условия,

анализировать результаты, выполнять оптимизацию. Лабораторные работы выполняются в соответствии с методическими указаниями и защищаются студентом путем ответов на контрольные вопросы. Проверяемые индикаторы: ИПК-2.1, ИПК-2.2, ИПК-2.3, ИПК-2.7, ИПК-2.8.

Индивидуальное задание в рамках сквозного проекта

Индивидуальное задание в рамках сквозного проекта является одним из ключевых методов контроля, позволяющим оценить способность студента применять полученные теоретические знания и практические навыки для решения комплексной профессиональной задачи. Задание выполняется студентом самостоятельно в течение семестра и представляет собой разработку раздела сквозного проекта, связанного с CAE-анализом и оптимизацией детали двигателя. Содержание индивидуального задания включает выбор детали для анализа (поршень, шатун, коленчатый вал), импорт и подготовку геометрии, построение конечно-элементной сетки, задание граничных условий и нагрузок (с использованием результатов динамического и теплового расчёта), проведение прочностного анализа, анализ усталостной долговечности, выполнение топологической или параметрической оптимизации, интерпретацию результатов, формулирование рекомендаций по изменению конструкции. Индивидуальное задание выполняется в форме пояснительной записки объёмом 10-15 страниц с графическими материалами. Защита индивидуального задания проводится в форме презентации результатов перед преподавателем. Проверяемые индикаторы: ИПК-2.1, ИПК-2.2, ИПК-2.3, ИПК-2.7, ИПК-2.8.

Экзамен

Промежуточная аттестация проводится в форме экзамена по завершении изучения дисциплины. Экзамен позволяет комплексно оценить знания, умения и навыки студента по всем разделам дисциплины. Экзаменационный билет включает два теоретических вопроса (по основным разделам CAE-анализа и оптимизации) и одно практическое задание (анализ результатов расчёта или обоснование выбора параметров модели). 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: ИПК-2.1, ИПК-2.2, ИПК-2.3, ИПК-2.7, ИПК-2.8.

Роль дисциплины в оценке результатов сквозного проекта

Дисциплина «Расчет и оптимизация деталей двигателя» формирует фундаментальные знания и навыки, необходимые для выполнения третьего этапа сквозного проекта — «Расчётное обоснование, верификация и оптимизация». В рамках этого этапа студент должен выполнить CAE-анализ ответственных деталей проектируемого двигателя, определить напряжённо-деформированное состояние, оценить усталостную долговечность, выполнить оптимизацию конструкции для снижения массы при сохранении прочности. Результаты освоения дисциплины оцениваются в ходе защиты индивидуального задания и отчёта по третьему этапу сквозного проекта. Оценка сформированности компетенции ПК-2 по дисциплине учитывается при подведении итогов выполнения сквозного проекта в целом.

7.2 Шкала и критерии оценивания результатов обучения

7.2.1 Критерии оценки текущего (рубежного) тестирования по модулям

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

Оценка «зачтено» выставляется студенту, если выполнено верно более 75% заданий теста (набрано более 15 баллов). Студент, получивший «зачтено», демонстрирует достаточное знание теоретического материала модуля, владеет основами метода конечных элементов, понимает принципы построения расчётных сеток, задания граничных условий, проведения прочностного, теплового и усталостного анализа, методов оптимизации. Это свидетельствует о

сформированности на пороговом уровне индикаторов ИПК-2.1, ИПК-2.2, ИПК-2.3, ИПК-2.7, ИПК-2.8 в части теоретических основ CAE-анализа и оптимизации.

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 понимании принципов МКЭ, не может выбрать тип конечных элементов, не понимает методов оптимизации. Студент обязан ликвидировать задолженность по модулю до прохождения следующего рубежного контроля.

7.2.2 Критерии оценки итогового тестирования по курсу

Итоговое тестирование проводится после завершения изучения всех модулей. Тест состоит из 30 заданий, охватывающих весь материал дисциплины. 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 дисциплины, уверенно ориентируется в методах CAE-анализа, понимает принципы построения расчётных моделей, выбора граничных условий, проведения различных видов анализа, методов оптимизации. Сформированность индикаторов ИПК-2.1, ИПК-2.2, ИПК-2.3, ИПК-2.7, ИПК-2.8 оценивается на продвинутом уровне, что позволяет студенту успешно выполнить раздел сквозного проекта, связанный с CAE-анализом и оптимизацией.

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 выбором моделей турбулентности или методов оптимизации. Сформированность индикаторов 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 выборе типа конечных элементов или интерпретации результатов, не в полной мере владеет профессиональной терминологией. Сформированность индикаторов 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 выбрать тип анализа, допускает грубые ошибки. Сформированность индикаторов не достигла порогового уровня, что делает невозможным выполнение раздела сквозного проекта по CAE-анализу без дополнительной подготовки.

7.2.3 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 теоретических основ МКЭ, методов построения расчётных сеток, задания граничных условий, проведения прочностного, теплового, усталостного анализа, методов топологической и параметрической оптимизации. Уверенно и аргументированно отвечает на дополнительные вопросы, свободно владеет профессиональной терминологией. В контексте сквозного проекта такой уровень подготовки позволяет студенту самостоятельно выполнять CAE-анализ и оптимизацию деталей проектируемого 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 выполнять типовые расчёты, но может испытывать затруднения при ответе на уточняющие вопросы или при объяснении сложных разделов. В целом демонстрирует хорошее владение профессиональной терминологией.

Оценка «удовлетворительно» выставляется студенту, который имеет знания только основного материала, но не усвоил его деталей. Студент допускает неточности и ошибки в изложении, испытывает затруднения при выборе типа конечных элементов, 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 объяснить принципы МКЭ. Отсутствует понимание методологии CAE-анализа. Не способен ответить на дополнительные вопросы, не владеет профессиональной терминологией. Студент не готов к выполнению раздела сквозного проекта по CAE-анализу.

7.2.4 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 импорта геометрии, построения сетки, задания граничных условий, проведения анализа, интерпретации результатов, выполнения оптимизации. 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 CAE-анализа, необходимыми для выполнения третьего этапа сквозного проекта.

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

7.2.5 Критерии оценки лабораторных работ

Оценка «зачтено» выставляется студенту, который выполнил лабораторную работу в полном объёме, в установленные сроки. Студент продемонстрировал умение работать в CAE-системе, строить конечно-элементные модели, задавать граничные условия, проводить расчёты, анализировать результаты, выполнять оптимизацию. При защите работы студент показывает понимание цели и методики проведения работы, уверенно отвечает на контрольные вопросы, правильно интерпретирует полученные результаты. Отчёт оформлен в соответствии с требованиями. Успешное выполнение лабораторных работ позволяет студенту получить практический опыт CAE-анализа, необходимый для верификации расчётных моделей в рамках сквозного проекта.

Оценка «не зачтено» выставляется студенту, который не выполнил лабораторную работу, выполнил её не в полном объёме, или выполнил с грубыми ошибками. При защите студент не понимает цели и методики работы, не может ответить на контрольные вопросы, допускает грубые ошибки в интерпретации результатов. Отсутствует отчёт или он оформлен с грубыми нарушениями требований. Студент обязан выполнить лабораторную работу повторно в установленные преподавателем сроки.

7.2.6 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 CAE-анализа и оптимизации, самостоятельно выполняет импорт и подготовку геометрии, строит качественную конечно-элементную сетку, корректно задаёт граничные условия и нагрузки, проводит прочностной, тепловой и усталостный анализ, выполняет оптимизацию, аргументированно интерпретирует результаты, формулирует обоснованные рекомендации по изменению конструкции. 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 детали. Сформированность индикаторов ИПК-2.1, ИПК-2.2, ИПК-2.3, ИПК-2.7, ИПК-2.8 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 параметров. Студент демонстрирует понимание методов CAE-анализа, способен выполнять основные этапы, но может испытывать затруднения при выборе модели материала или при интерпретации сложных результатов. Пояснительная записка оформлена в соответствии с требованиями, но содержит незначительные замечания. При защите студент в целом отвечает

на вопросы, но может допускать неточности. Сформированность индикаторов оценивается на базовом уровне.

Оценка «удовлетворительно» выставляется студенту, который выполнил индивидуальное задание, но допустил существенные ошибки в расчётах или не полностью выполнил требуемые разделы. Студент демонстрирует фрагментарные знания методов CAE-анализа, испытывает значительные затруднения при построении сетки или задании граничных условий. Пояснительная записка оформлена с нарушениями требований. При защите студент отвечает на вопросы неуверенно, требует наводящих вопросов. Сформированность индикаторов оценивается на пороговом уровне.

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

7.2.7 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 теоретических основ МКЭ, методов построения расчётных сеток, задания граничных условий, проведения прочностного, теплового, усталостного анализа, методов топологической и параметрической оптимизации. Уверенно и без ошибок выполняет практическое задание (анализ результатов расчёта или обоснование выбора параметров), аргументирует последовательность действий, делает обоснованные выводы. Даёт полные ответы на дополнительные вопросы, свободно владеет профессиональной терминологией. Сформированность индикаторов ИПК-2.1, ИПК-2.2, ИПК-2.3, ИПК-2.7, ИПК-2.8 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 выполнять типовые расчёты. Выполняет практическое задание в целом правильно, но может испытывать затруднения при обосновании отдельных этапов. На дополнительные вопросы отвечает в целом правильно, но допускает несущественные ошибки. Сформированность индикаторов оценивается на базовом уровне.

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

Оценка «неудовлетворительно» выставляется студенту, который не знает значительной части программного материала, допускает грубые ошибки в изложении теоретических вопросов. Студент не может выполнить практическое задание или выполняет его с грубыми ошибками, не понимает сути задания. Не способен ответить на дополнительные вопросы, не владеет профессиональной терминологией. Сформированность индикаторов не достигла порогового уровня, что делает невозможным выполнение третьего этапа сквозного проекта.

7.3 Оценочные средства

7.3.1 Текущий контроль

Модульная структура дисциплины

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

Модуль 1 (недели 1–8) — Основы CAE-анализа. Подготовка моделей. Прочностной анализ

Включает темы: Тема 1. Введение в CAE-анализ. Основы метода конечных элементов (МКЭ); Тема 2. Подготовка геометрических моделей для расчёта; Тема 3. Построение конечно-элементной сетки; Тема 4. Задание граничных условий и нагрузок; Тема 5. Прочностной анализ деталей КШМ (поршень, шатун, коленчатый вал).

Модуль 2 (недели 9–16) — Тепловой анализ. Усталостный анализ. Оптимизация

Включает темы: Тема 6. Тепловой анализ и сопряжённый теплообмен; Тема 7. Усталостный анализ (Fatigue); Тема 8. Топологическая и параметрическая оптимизация; Тема 9. Анализ и интерпретация результатов. Верификация моделей.

Рубежный контроль по модулям (устный опрос/собеседование)

Модуль 1. Основы CAE-анализа. Подготовка моделей. Прочностной анализ

Перечень вопросов для собеседования:

1. Роль инженерного анализа (CAE) в современном проектировании. Место дисциплины в сквозном проекте: верификация и оптимизация конструкций.
2. Основные этапы CAE-анализа. Физические основы МКЭ: дискретизация сплошной среды, виды конечных элементов (1D, 2D, 3D).
3. Понятие о функциях формы, узловых перемещениях, матрице жёсткости. Обзор современных CAE-пакетов (ANSYS Workbench, APM WinMachine, OpenFOAM и др.).
4. Требования к геометрическим моделям для конечно-элементного анализа. Импорт геометрии из CAD-систем (форматы STEP, IGES, Parasolid).
5. Очистка и упрощение геометрии: удаление мелких элементов (фасок, скруглений, отверстий), не влияющих на напряжённо-деформированное состояние.
6. Декомпозиция сложной геометрии на простые объёмы для построения качественной сетки. Создание расчётных сечений. Подготовка модели для сопряжённого теплообмена.
7. Типы конечных элементов: стержневые, пластинчатые, объёмные (тетраэдры, гексаэдры). Влияние типа элемента на точность расчёта.
8. Методы построения сетки: автоматическая, структурированная (hex-dominant), гибридная. Параметры сетки: размер элемента, сгущение в зонах концентрации напряжений.
9. Понятие о качестве сетки: ортогональность, skewness, аспектное отношение. Построение пограничного слоя (inflation) для задач теплообмена и гидродинамики.
10. Типы граничных условий: закрепления (жесткая заделка, шарнирное опирание, цилиндрическая опора, трение), симметрия, антисимметрия.
11. Задание нагрузок: силы, давление, моменты, гидростатическое давление, тепловые нагрузки (температура, тепловой поток, конвекция). Способы приложения нагрузок к модели.
12. Учёт инерционных нагрузок (центробежные силы). Задание контактных взаимодействий (склейка, трение, без разделения). Использование результатов динамического расчёта в качестве граничных условий.
13. Особенности расчёта поршня: задание давления газов на днище, сил инерции, температурных нагрузок. Учёт контакта поршня с гильзой и поршневого пальца.
14. Особенности расчёта шатуна: задание сил в верхней и нижней головках, учёт запрессованной втулки. Расчёт стержня шатуна на устойчивость.
15. Особенности расчёта коленчатого вала: задание нагрузок от шатунов, учёт центробежных сил. Определение напряжений в галтелях и масляных отверстиях.

Модуль 2. Тепловой анализ. Усталостный анализ. Оптимизация

Перечень вопросов для собеседования:

1. Основы теплопередачи: теплопроводность, конвекция, тепловое излучение. Постановка задач теплового анализа.

2. Граничные условия теплового анализа: задание температуры, теплового потока, коэффициента теплоотдачи и температуры среды.

3. Определение температурных полей в деталях двигателя (поршень, головка блока, клапан, гильза). Учёт тепловых напряжений.

4. Сопряжённый теплообмен (CHT): одновременный расчёт течения жидкости/газа и теплопередачи в твёрдом теле.

5. Основы теории усталостной прочности. Циклические нагрузки. Кривая усталости (SN-кривая). Предел выносливости.

6. Влияние концентраторов напряжений, качества обработки поверхности, масштабного фактора на предел выносливости.

7. Методы суммирования усталостных повреждений. Проведение усталостного анализа в CAE-системах. Задание циклических нагрузок.

8. Определение ресурса (долговечности) детали. Анализ запасов прочности при циклических нагрузках.

9. Цели оптимизации конструкции: снижение массы, обеспечение заданной прочности и жёсткости. Параметрическая оптимизация: варьирование размеров (параметров) модели.

10. Топологическая оптимизация: определение оптимального распределения материала в заданной расчётной области при заданных нагрузках и ограничениях.

11. Постановка задачи оптимизации: целевая функция, проектные переменные, ограничения. Проведение топологической оптимизации детали (шатуна, поршня, кронштейна).

12. Интерпретация результатов оптимизации и реконструкция геометрии.

13. Методы визуализации результатов: поля напряжений, деформаций, температур, запасов прочности. Построение графиков, сечений.

14. Анализ сходимости решения. Оценка достоверности полученных результатов. Сравнение с аналитическими решениями (для тестовых задач).

15. Верификация расчётных моделей с помощью экспериментальных данных (тензометрия, термометрия). Оформление отчёта по результатам CAE-анализа.

Рубежный контроль по модулям (тестирование)

Тестирование проводится после завершения изучения каждого модуля. Тест состоит из 20 заданий различного типа (выбор правильного ответа, установление соответствия, краткий ответ, расчётная задача). Каждое верно выполненное задание оценивается в 1 балл. Максимальное количество баллов за тест – 20. Оценка «зачтено» выставляется при выполнении верно более 75% заданий (более 15 баллов).

Пример тестовых заданий (один вариант)

1. **Какой тип конечных элементов рекомендуется использовать для моделирования тонкостенных конструкций?**

2. A) Стержневые элементы

3. B) Объёмные элементы (тетраэдры)

4. C) Пластинчатые (оболочечные) элементы

5. D) Точечные элементы

Правильный ответ: C

6. **Какой параметр качества сетки характеризует отклонение формы ячейки от идеальной?**

7. A) Аспектное отношение

8. B) Ортогональность

9. C) Skewness

10. D) Размер ячейки

Правильный ответ: C

11. **Какое граничное условие используется для задания теплообмена между поверхностью детали и окружающей средой?**

12. A) Задание температуры

13. B) Задание теплового потока

14. C) Задание коэффициента теплоотдачи и температуры среды

15. D) Задание теплового излучения

Правильный ответ: C

16. **Какая кривая используется для оценки усталостной долговечности материала?**

17. A) Кривая деформирования

18. B) SN-кривая (кривая Велера)

19. C) Кривая ползучести

20. D) Диаграмма растяжения

Правильный ответ: B

21. **Какой тип оптимизации позволяет определить оптимальное распределение материала в заданной области?**

22. A) Параметрическая оптимизация

23. B) Топологическая оптимизация

24. C) Размерная оптимизация

25. D) Формообразующая оптимизация

Правильный ответ: B

Оценочные средства для индивидуального задания в рамках сквозного проекта

Индивидуальное задание в рамках сквозного проекта является одним из ключевых методов контроля, позволяющим оценить способность студента применять полученные теоретические знания и практические навыки для решения комплексной профессиональной задачи. Задание выполняется студентом самостоятельно в течение семестра и представляет собой разработку раздела сквозного проекта, связанного с CAE-анализом и оптимизацией детали двигателя.

Содержание индивидуального задания:

Индивидуальное задание включает в себя выполнение следующих этапов:

1. **Выбор детали для анализа.** Студент выбирает одну из ответственных деталей поршневого двигателя (поршень, шатун, коленчатый вал, поршневой палец, клапан) для проведения CAE-анализа и оптимизации.

2. **Подготовка геометрической модели.** Импорт геометрии из CAD-системы (или создание упрощённой модели). Выполняется очистка и упрощение геометрии: удаление мелких элементов (фасок, скруглений, отверстий), не влияющих на напряжённо-деформированное состояние. При необходимости выполняется декомпозиция модели на объёмы.

3. **Построение конечно-элементной сетки.** Выбор типа конечных элементов. Построение сетки с контролем качества (ортогональность, skewness, аспектное отношение). Сгущение сетки в зонах концентрации напряжений. Построение пограничного слоя (при необходимости).

4. **Задание граничных условий и нагрузок.** Определение граничных условий (закрепления, симметрия). Задание нагрузок: силы давления газов, силы инерции (с использованием результатов динамического расчёта), тепловые нагрузки (при необходимости). Задание контактных взаимодействий.

5. **Проведение прочностного анализа.** Запуск расчёта. Определение напряжённо-деформированного состояния детали. Анализ распределения напряжений, выявление опасных зон. Определение запасов прочности.

6. **Проведение теплового анализа (при необходимости).** Для теплонапряжённых деталей (поршень, клапан) выполняется тепловой анализ. Определяются температурные поля. При необходимости выполняется связанный термомеханический анализ.

7. **Анализ усталостной долговечности.** Задание циклических нагрузок. Определение ресурса (долговечности) детали. Анализ запасов прочности при циклических нагрузках.

8. **Оптимизация конструкции.** Выполнение топологической или параметрической оптимизации для снижения массы детали при сохранении прочности и жёсткости. Интерпретация результатов оптимизации. Реконструкция геометрии (при необходимости).

9. **Верификация модели.** Сравнение результатов с аналитическими решениями (для тестовых задач) или с экспериментальными данми (при наличии). Оценка сходимости решения.

10. **Подготовка отчёта.** Оформление пояснительной записки с описанием всех этапов анализа, результатами расчётов, графическими материалами (поля напряжений, деформаций, температур, результаты оптимизации), выводами и рекомендациями по изменению конструкции.

Требования к оформлению:

Индивидуальное задание выполняется в форме пояснительной записки объемом 10-15 страниц, включающей:

- титульный лист с указанием темы задания, ФИО студента, группы, руководителя;
- содержание;
- введение с обоснованием актуальности CAE-анализа выбранной детали;
- основную часть, содержащую описание всех этапов анализа;
- графические материалы (поля напряжений, деформаций, температур, результаты оптимизации);
- заключение с выводами по результатам выполненной работы;
- список использованных источников.

Примерные темы индивидуальных заданий:

1. Прочностной анализ и оптимизация поршня дизельного двигателя.
2. Прочностной анализ и оптимизация шатуна двигателя внутреннего сгорания.
3. Прочностной анализ и оптимизация коленчатого вала рядного двигателя.
4. Тепловой и термомеханический анализ поршня двигателя с турбонаддувом.
5. Усталостный анализ коленчатого вала при циклическом нагружении.
6. Топологическая оптимизация шатуна для снижения массы.
7. Контактный анализ узла «поршневое кольцо — гильза цилиндра».
8. Прочностной анализ и оптимизация поршневого пальца.
9. Тепловой анализ клапана газораспределительного механизма.
10. Комбинированный термомеханический анализ головки блока цилиндров.

Оценочные средства для практических занятий

Типовые задания для практических занятий

Модуль 1. Основы CAE-анализа. Подготовка моделей. Прочностной анализ

Задание 1. Обзор интерфейса CAE-пакета. Типы анализа. Создание проекта

Ознакомление с интерфейсом CAE-пакета (ANSYS Workbench, APM WinMachine). Создание нового проекта. Выбор типа анализа (статический, тепловой, модальный).

Задание 2. Импорт и упрощение геометрической модели поршня для расчёта

Импорт геометрии поршня из CAD-системы. Выполнение очистки и упрощения модели: удаление мелких фасок, скруглений, отверстий. Сохранение упрощённой модели.

Задание 3. Построение и контроль качества сетки для модели поршня

Построение конечно-элементной сетки для модели поршня. Выбор типа элементов. Контроль качества сетки (ортогональность, skewness, аспектное отношение). Сгущение сетки в зонах концентрации напряжений.

Задание 4. Задание граничных условий и нагрузок для модели поршня

Задание граничных условий (закрепление по оси поршневого пальца). Задание давления газов на днище поршня. Задание сил инерции (при необходимости). Учёт контакта поршня с гильзой.

Задание 5. Расчёт и анализ НДС поршня

Запуск расчёта. Получение полей напряжений (эквивалентные напряжения по Мизесу), деформаций, перемещений. Выявление опасных зон. Определение максимальных напряжений.

Модуль 2. Тепловой анализ. Усталостный анализ. Оптимизация

Задание 6. Постановка задачи теплового анализа поршня. Задание граничных условий

Задание граничных условий теплового анализа: температуры на поверхности камеры сгорания, коэффициенты теплоотдачи на различных поверхностях поршня. Запуск теплового расчёта.

Задание 7. Настройка параметров усталостного анализа

Задание циклических нагрузок (амплитуда, среднее напряжение). Выбор SN-кривой материала. Настройка метода суммирования повреждений. Запуск усталостного анализа. Определение ресурса детали.

Задание 8. Постановка задачи топологической оптимизации для шатуна

Выбор расчётной области (деталь). Задание целевой функции (минимизация массы). Задание ограничений (максимальные напряжения, жёсткость, частота собственных колебаний). Запуск оптимизации.

Задание 9. Анализ и интерпретация результатов. Оформление отчёта

Анализ полученных полей напряжений, деформаций, температур, результатов оптимизации. Построение графиков, сечений. Формулирование выводов. Оформление отчёта по результатам CAE-анализа.

Оценочные средства для лабораторных занятий

Перечень лабораторных работ и контрольные вопросы для защиты

Лабораторная работа №1. Статический анализ простой детали (балка, пластина) с известным аналитическим решением

Краткое содержание: создание модели простой детали (консольная балка, пластина). Построение сетки. Задание граничных условий и нагрузок. Проведение статического анализа. Сравнение результатов с аналитическим решением.

Контрольные вопросы для защиты:

- Как проверяется точность расчёта?
- Какие факторы влияют на сходимость решения?
- Как сравнить численное и аналитическое решения?
- Что такое верификация расчётной модели?

Лабораторная работа №2. Импорт геометрии, упрощение и построение сетки для модели поршня

Краткое содержание: импорт геометрии поршня из CAD-системы. Упрощение модели (удаление мелких элементов). Построение конечно-элементной сетки. Контроль качества сетки.

Контрольные вопросы для защиты:

- Какие элементы геометрии можно удалять без потери точности расчёта?
- Как оценить качество сетки?
- Какие параметры сетки влияют на точность расчёта?
- Как выполнить сгущение сетки в зонах концентрации напряжений?

Лабораторная работа №3. Прочностной анализ поршня на режиме номинальной мощности

Краткое содержание: задание граничных условий и нагрузок для поршня. Проведение прочностного анализа. Определение напряжённо-деформированного состояния. Выявление опасных зон. Расчёт запаса прочности.

Контрольные вопросы для защиты:

- Какие нагрузки действуют на поршень?
- Как задаются граничные условия для поршня?
- Где возникают максимальные напряжения?
- Как определяется запас прочности?

Лабораторная работа №4. Прочностной анализ шатуна на режиме максимальной нагрузки

Краткое содержание: создание модели шатуна. Задание граничных условий (закрепление в верхней и нижней головках). Задание нагрузок (сила сжатия, сила растяжения). Проведение прочностного анализа. Оценка устойчивости стержня.

Контрольные вопросы для защиты:

- Какие режимы нагружения шатуна рассматриваются?
- Как задаются граничные условия для шатуна?
- Как проверяется устойчивость стержня шатуна?
- Каковы особенности расчёта шатуна с учётом запрессованной втулки?

Лабораторная работа №5. Прочностной анализ коленчатого вала (фрагмента)

Краткое содержание: создание модели фрагмента коленчатого вала (шатунная шейка с прилегающими щеками). Задание граничных условий. Задание нагрузок (сила от шатуна, центробежные силы). Проведение прочностного анализа. Анализ напряжений в галтелях и масляных отверстиях.

Контрольные вопросы для защиты:

- Какие нагрузки действуют на коленчатый вал?
- Где возникают максимальные напряжения?
- Как учитывается концентрация напряжений в галтелях?
- Как оценивается усталостная прочность коленчатого вала?

Лабораторная работа №6. Тепловой анализ поршня (определение температурных полей)

Краткое содержание: задание граничных условий теплового анализа: температуры на поверхности камеры сгорания, коэффициенты теплоотдачи на различных поверхностях поршня. Проведение теплового расчёта. Определение температурных полей.

Контрольные вопросы для защиты:

- Какие граничные условия задаются для теплового анализа поршня?
- Как распределяется температура по высоте поршня?
- Какие факторы влияют на тепловое состояние поршня?
- Как учитывается охлаждение поршня?

Лабораторная работа №7. Усталостный анализ коленчатого вала

Краткое содержание: задание циклических нагрузок. Выбор SN-кривой материала. Проведение усталостного анализа. Определение ресурса (долговечности) коленчатого вала.

Контрольные вопросы для защиты:

- Что такое SN-кривая?
- Как учитывается концентрация напряжений при усталостном анализе?
- Как определяется ресурс детали?
- Какие факторы влияют на усталостную долговечность?

Лабораторная работа №8. Топологическая оптимизация шатуна для снижения массы

Краткое содержание: выбор расчётной области (объём шатуна). Задание целевой функции (минимизация массы). Задание ограничений (максимальные напряжения, жёсткость). Проведение топологической оптимизации. Интерпретация результатов.

Контрольные вопросы для защиты:

- Что такое топологическая оптимизация?

- Как формулируется задача оптимизации?
- Как интерпретировать результаты топологической оптимизации?
- Как реконструировать геометрию по результатам оптимизации?

Лабораторная работа №9. Комплексный анализ детали по индивидуальному заданию

Краткое содержание: выполнение полного цикла CAE-анализа для выбранной детали (поршень, шатун, коленчатый вал) по индивидуальному заданию. Включает подготовку геометрии, построение сетки, задание граничных условий, проведение прочностного анализа, при необходимости — теплового и усталостного анализа, оптимизацию.

Контрольные вопросы для защиты:

- Каковы основные этапы CAE-анализа?
- Какие трудности возникают при подготовке модели?
- Как оценить достоверность полученных результатов?
- Какие рекомендации можно дать по изменению конструкции?

Оценочные средства для курсовой работы (проекта)

Курсовой проект (курсовая работа) по дисциплине не предусмотрены учебным планом. Результаты освоения дисциплины используются при выполнении выпускной квалификационной работы для CAE-анализа и оптимизации разрабатываемых узлов двигателя.

7.3.2 Промежуточная аттестация (экзамен)

Условия допуска к экзамену

Студент допускается к сдаче экзамена при выполнении следующих условий:

- Успешное прохождение всех двух рубежных контролей (устных опросов по модулям) с оценкой не ниже «удовлетворительно».
- Выполнение и защита всех лабораторных работ, предусмотренных учебным планом (9 лабораторных работ).
- Выполнение и защита всех практических занятий (не менее 80% заданий выполнены и защищены).
- Выполнение и защита индивидуального задания в рамках сквозного проекта (CAE-анализ и оптимизация детали 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 (анализ результатов расчёта или обоснование выбора параметров).

Структура билета:

- **Вопрос 1** (Модуль 1): Основы CAE-анализа, подготовка моделей, прочностной анализ.
- **Вопрос 2** (Модуль 2): Тепловой анализ, усталостный анализ, оптимизация, верификация.
- **Задание 3**: Практическое задание (анализ представленных результатов CAE-расчёта, обоснование выбора параметров модели, интерпретация полей напряжений и т.п.).

Типовые экзаменационные билеты

Экзаменационный билет №1

Вопрос 1 (Модуль 1)

Основы метода конечных элементов (МКЭ). Дискретизация сплошной среды. Виды конечных элементов (1D, 2D, 3D). Понятие о функциях формы, узловых перемещениях, матрице жёсткости. Типы конечных элементов и их применение.

Вопрос 2 (Модуль 2)

Методы оптимизации в CAE-системах. Параметрическая оптимизация: варьирование размеров модели. Топологическая оптимизация: определение оптимального распределения материала. Постановка задачи оптимизации: целевая функция, проектные переменные, ограничения.

Задание 3

На рисунке представлены результаты прочностного анализа поршня (поля эквивалентных напряжений). Определите опасные зоны. Какие изменения конструкции можно предложить для снижения максимальных напряжений?

Экзаменационный билет №2

Вопрос 1 (Модуль 1)

Построение конечно-элементной сетки. Типы сеток: структурированные, неструктурированные, гибридные. Параметры сетки: размер элемента, сгущение в зонах концентрации напряжений. Понятие о качестве сетки: ортогональность, skewness, аспектное отношение.

Вопрос 2 (Модуль 2)

Усталостный анализ (Fatigue). Основы теории усталостной прочности. Кривая усталости (SN-кривая). Предел выносливости. Влияние концентраторов напряжений, качества обработки поверхности, масштабного фактора. Методы суммирования усталостных повреждений.

Задание 3

Для шатуна, работающего в условиях циклического нагружения, требуется провести усталостный анализ. Какие исходные данные необходимы? Как задаются циклические нагрузки? Как интерпретировать результаты усталостного анализа (ресурс, запас прочности)?

Экзаменационный билет №3

Вопрос 1 (Модуль 1)

Задание граничных условий и нагрузок в CAE-системах. Типы граничных условий: закрепления (жесткая заделка, шарнирное опирание, трение), симметрия. Задание нагрузок: силы, давление, моменты, тепловые нагрузки. Способы приложения нагрузок. Контактные взаимодействия.

Вопрос 2 (Модуль 2)

Тепловой анализ и сопряжённый теплообмен. Основы теплопередачи. Постановка задач теплового анализа. Граничные условия теплового анализа: задание температуры, теплового потока, коэффициента теплоотдачи. Сопряжённый теплообмен (CHT).

Задание 3

На рисунке представлены результаты теплового анализа поршня (поля температур). Как распределяется температура по высоте поршня? Какие факторы влияют на тепловое состояние поршня? Какие конструктивные мероприятия могут быть предложены для снижения тепловой напряжённости?

Полный перечень теоретических вопросов к экзамену по каждой теме

Модуль 1. Основы CAE-анализа. Подготовка моделей. Прочностной анализ

1. Роль инженерного анализа (CAE) в современном проектировании. Место дисциплины в сквозном проекте: верификация и оптимизация конструкций.
2. Основные этапы CAE-анализа. Физические основы МКЭ: дискретизация сплошной среды, виды конечных элементов (1D, 2D, 3D).

3. Понятие о функциях формы, узловых перемещениях, матрице жёсткости. Обзор современных CAE-пакетов.

4. Требования к геометрическим моделям для конечно-элементного анализа. Импорт геометрии из CAD-систем (форматы STEP, IGES, Parasolid).

5. Очистка и упрощение геометрии: удаление мелких элементов (фасок, скруглений, отверстий), не влияющих на напряжённо-деформированное состояние.

6. Декомпозиция сложной геометрии на простые объёмы для построения качественной сетки. Создание расчётных сечений.

7. Подготовка модели для сопряжённого теплообмена. Работа с геометрией в препроцессоре CAE-системы.

8. Типы конечных элементов: стержневые, пластинчатые, объёмные (тетраэдры, гексаэдры). Влияние типа элемента на точность расчёта.

9. Методы построения сетки: автоматическая, структурированная (hex-dominant), гибридная. Параметры сетки: размер элемента, сгущение в зонах концентрации напряжений.

10. Понятие о качестве сетки: ортогональность, skewness, аспектное отношение. Построение пограничного слоя (inflation) для задач теплообмена и гидродинамики.

11. Проверка качества построенной сетки и её адаптация. Ручное управление параметрами сетки.

12. Типы граничных условий: закрепления (жесткая заделка, шарнирное опирание, цилиндрическая опора, трение), симметрия, антисимметрия.

13. Задание нагрузок: силы, давление, моменты, гидростатическое давление, тепловые нагрузки (температура, тепловой поток, конвекция).

14. Способы приложения нагрузок к модели (к вершинам, рёбрам, граням, телам). Учёт инерционных нагрузок (центробежные силы).

15. Задание контактных взаимодействий (склейка, трение, без разделения). Использование результатов динамического расчёта в качестве граничных условий.

16. Особенности расчёта поршня: задание давления газов на днище, сил инерции, температурных нагрузок. Учёт контакта поршня с гильзой и поршневого пальца.

17. Особенности расчёта шатуна: задание сил в верхней и нижней головках, учёт запрессованной втулки. Расчёт стержня шатуна на устойчивость.

18. Особенности расчёта коленчатого вала: задание нагрузок от шатунов, учёт центробежных сил. Определение напряжений в галтелях и масляных отверстиях.

Модуль 2. Тепловой анализ. Усталостный анализ. Оптимизация

19. Основы теплопередачи: теплопроводность, конвекция, тепловое излучение. Постановка задач теплового анализа.

20. Граничные условия теплового анализа: задание температуры, теплового потока, коэффициента теплоотдачи и температуры среды.

21. Определение температурных полей в деталях двигателя (поршень, головка блока, клапан, гильза). Учёт тепловых напряжений.

22. Сопряжённый теплообмен (CHT): одновременный расчёт течения жидкости/газа и теплопередачи в твёрдом теле.

23. Основы теории усталостной прочности. Циклические нагрузки. Кривая усталости (SN-кривая). Предел выносливости.

24. Влияние концентраторов напряжений, качества обработки поверхности, масштабного фактора на предел выносливости.

25. Методы суммирования усталостных повреждений. Проведение усталостного анализа в CAE-системах. Задание циклических нагрузок.

26. Определение ресурса (долговечности) детали. Анализ запасов прочности при циклических нагрузках.

27. Цели оптимизации конструкции: снижение массы, обеспечение заданной прочности и жёсткости.

28. Параметрическая оптимизация: варьирование размеров (параметров) модели для достижения целевой функции.

29. Топологическая оптимизация: определение оптимального распределения материала в заданной расчётной области при заданных нагрузках и ограничениях.

30. Постановка задачи оптимизации: целевая функция, проектные переменные, ограничения. Проведение топологической оптимизации детали (шатуна, поршня, кронштейна).

31. Интерпретация результатов оптимизации и реконструкция геометрии.

32. Методы визуализации результатов: поля напряжений, деформаций, температур, запасов прочности. Построение графиков, сечений.

33. Анализ сходимости решения. Оценка достоверности полученных результатов. Сравнение с аналитическими решениями (для тестовых задач).

34. Верификация расчётных моделей с помощью экспериментальных данных (тензометрия, термометрия). Оформление отчёта по результатам CAE-анализа.