Документ подписан простой электронной подписью
Информация о владельце:
ФИО: Максимов Алексей Борисович
Должность: директор департамента по образовательной политике
Дата подписания: 13.08.2026 10:35:49
Уникальный программный ключ:
8db180d1a3f02ac9e60521a5672742735c18b1d6

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Московский политехнический университет»
(МОСКОВСКИЙ ПОЛИТЕХ)

Кафедра «Энергоустановки для транспорта и малой энергетики»

**Надарейшвили Г.Г., Курмаев Р.Х., Апелинский Д.В.**

# Конструирование и расчет поршневых двигателей

*Методические указания*

*по подготовке курсового проекта для студентов, обучающихся по направлению 13.03.03 «Энергетическое машиностроение», профиль «Поршневые двигатели и турбомашины»*

*Одобрено учебно-методической комиссией транспортного факультета*

Москва 2026 г.

УДК 621.43
ББК 39.33-08
Н15

**Авторский коллектив:** Надарейшвили Г.Г., Курмаев Р.Х., Апелинский Д.В.

**Конструирование и расчет поршневых двигателей:** учебное пособие. – М.: Московский политехнический университет, 2026.– 52 с.

Методические указания содержат методику выполнения прочностного анализа деталей кривошипно-шатунного механизма методом конечных элементов в CAE-системах. В пособии изложены этапы импорта геометрии, построения конечно-элементной сетки, задания граничных условий и нагрузок, интерпретации полей напряжений и деформаций, а также проведения параметрической и топологической оптимизации. Предназначено для студентов, обучающихся по направлению подготовки бакалавров 13.03.03 «Энергетическое машиностроение», профиль «Поршневые двигатели и турбомашины».

**УДК 621.43**
**ББК 39.33-08**

# Содержание

**Введение** ..... **6**
Место дисциплины в образовательной программе ..... 6
Роль дисциплины в сквозном проектировании ..... 7
Связь с формируемыми компетенциями ..... 8
Цель и задачи учебного пособия ..... 9
Структура пособия ..... 9
**1. Цели и задачи курсового проекта** ..... **11**
1.1. Цель выполнения курсового проекта ..... 11
1.2. Задачи курсового проекта ..... 11
1.3. Формируемые компетенции и индикаторы их достижения ..... 13
1.4. Результат выполнения курсового проекта ..... 13
**2. Требования к содержанию и структуре работы** ..... **14**
2.1. Примерный перечень тем курсовых проектов ..... 14
2.2. Структура пояснительной записки ..... 15
2.3. Состав графической части ..... 17
**3. Исходные данные и их получение** ..... **17**
3.1. Источники исходных данных ..... 17
3.2. Связь с предшествующими дисциплинами ..... 18
3.3. Порядок получения индивидуального задания и согласования темы ..... 19
**4. Методические указания по выполнению курсового проекта** ..... **20**
4.1. Подготовительный этап ..... 20
4.2. Импорт и подготовка геометрии ..... 20
4.3. Задание свойств материалов ..... 21
4.4. Построение конечно-элементной сетки ..... 21
4.5. Задание граничных условий и нагрузок ..... 22
4.6. Прочностной анализ (FEA) ..... 22
4.7. Анализ усталостной долговечности ..... 23

4.8. Оптимизация конструкции ..... 23
4.9. Верификация расчётных моделей ..... 24
4.10. Типичные ошибки и способы их предотвращения ..... 24
**5. Требования к оформлению пояснительной записки ..... 24**
5.1. Общие требования к оформлению ..... 24
5.2. Оформление текста ..... 25
5.3. Оформление иллюстраций (рисунков) ..... 26
5.4. Оформление таблиц ..... 27
5.5. Оформление формул ..... 27
5.6. Оформление ссылок и списка литературы ..... 27
5.7. Оформление приложений ..... 28
**6. Требования к оформлению графической части ..... 28**
6.1. Состав графической части ..... 28
6.2. Требования к цветовым картам ..... 28
6.3. Требования к эскизным рабочим чертежам ..... 28
6.4. Требования к презентации ..... 29
**7. Программное обеспечение и инструменты ..... 29**
7.1. Основное программное обеспечение ..... 29
7.2. Вспомогательное программное обеспечение ..... 30
7.3. Учебные ресурсы по программному обеспечению ..... 31
7.4. Требования к форматам сдаваемых файлов ..... 31
7.5. Структура электронного архива ..... 31
**8. Организация выполнения и защиты курсового проекта ... 32**
8.1. Календарный план выполнения курсового проекта ..... 32
8.2. Взаимодействие с руководителем ..... 33
8.3. Порядок сдачи курсового проекта ..... 34
8.4. Защита курсового проекта ..... 34
8.5. Критерии оценки ..... 35
**9. Критерии оценки курсового проекта ..... 35**
9.1. Оценка «отлично» ..... 36
9.2. Оценка «хорошо» ..... 37

9.3. Оценка «удовлетворительно» ..... 37
9.4. Оценка «неудовлетворительно» ..... 38
9.5. Порядок апелляции ..... 39
**10. Список рекомендуемой литературы ..... 39**
10.1. Основная литература ..... 39
10.2. Дополнительная литература ..... 40
10.3. Периодические издания ..... 40
10.4. Электронные ресурсы ..... 40
10.5. Нормативно-техническая документация ..... 40
10.6. Рекомендации по работе с литературой ..... 41
**Приложения ..... 41**
Приложение А. Образец титульного листа пояснительной записки ..... 42
Приложение Б. Образец индивидуального задания ..... 43
Приложение В. Образец календарного плана ..... 44
Приложение Г. Образец рабочего дневника студента ..... 45
Приложение Д. Пример оформления цветовой карты напряжений ..... 46
Приложение Е. Пример аналитического расчёта для верификации ..... 46
Приложение Ж. Перечень вопросов для защиты курсового проекта ..... 47
Приложение З. Образец презентации (миниатюры слайдов) 47
**Заключение ..... 49**
**Библиографический список ..... 51**

# Введение

Дисциплина Б1.2.8 «Конструирование и расчет поршневых двигателей» занимает центральное, ключевое место в структуре подготовки бакалавров по направлению 13.03.03 «Энергетическое машиностроение» (профиль «Поршневые двигатели и турбомашины»). Она изучается в шестом семестре и относится к части блока Б1, формируемой участниками образовательных отношений. Если предшествующие дисциплины дали студенту знания о рабочих процессах (термодинамика) и силах, действующих в двигателе (динамика), то данная дисциплина отвечает на главный вопрос инженера-конструктора: выдержат ли спроектированные детали те нагрузки, которые на них действуют, и как сделать их одновременно прочными, надёжными и лёгкими?

## *Место дисциплины в образовательной программе*

Дисциплина опирается на фундаментальные знания и результаты, полученные студентами на предыдущих этапах сквозного проектирования. Из курсового проекта по дисциплине «Теория рабочих процессов поршневых двигателей» (Б1.1.20) используются данные о давлении газов в цилиндре как функции угла поворота коленчатого вала. Из курсового проекта по дисциплине «Динамический расчет поршневых двигателей» (Б1.2.4) используются значения сил, действующих в кривошипно-шатунном механизме, включая тангенциальную и радиальную составляющие. Из курсового проекта по дисциплине «Автоматизированное проектирование в двигателестроении» (Б1.1.12) используются 3D-модели деталей, которые служат основой для конечно-элементного анализа. Кроме того, используются знания из дисциплин «Сопротивление материалов» (методы расчёта напряжений и деформаций), «Конструкционные материалы» (свойства материалов), «Нормирование точности и метрология» (допуски и посадки).

В свою очередь, результаты освоения дисциплины «Конструирование и расчет поршневых двигателей» являются основой для последующего этапа сквозного проектирования —

разработки конструкторской документации и технологической подготовки производства (этап 4, дисциплины Б1.2.15 и Б1.2.16, а также производственные практики). На основании выполненных прочностных расчётов и оптимизации при необходимости корректируются 3D-модели деталей, после чего оформляется полный комплект конструкторской документации (рабочие чертежи с допусками и посадками) и разрабатываются технологические процессы изготовления.

### *Роль дисциплины в сквозном проектировании*

Образовательная программа построена на принципе сквозного проектирования, который пронизывает все четыре года обучения. Единый сквозной проект, выполняемый студентом индивидуально на протяжении 1–8 семестров, объединяет все профильные дисциплины и практики в единую логическую последовательность, результатом которой становится целостная выпускная квалификационная работа.

Курсовой проект по дисциплине «Конструирование и расчет поршневых двигателей» является ключевой составной частью отчёта по **третьему этапу сквозного проекта — «CAE. Расчёты» (6 семестр)**. Результатом выполнения данного курсового проекта становится **прочностной анализ основных деталей кривошипно-шатунного механизма и газораспределительного механизма методом конечных элементов (FEA)**, который включает следующие ключевые артефакты:

- конечно-элементные модели шатуна, поршневого пальца, поршня и коленчатого вала (или других деталей по согласованию с руководителем);
- заданные граничные условия (закрепления) и нагрузки (силы давления газов и инерционные силы, полученные из динамического расчёта);
- поля напряжений (эквивалентные напряжения по Мизесу), деформаций и коэффициенты запаса прочности;
- анализ наиболее нагруженных зон и выводы о работоспособности конструкции;
- параметрическую или топологическую оптимизацию конструкции (изменение геометрических параметров для

улучшения характеристик или перераспределение материала для минимизации массы при сохранении прочности);

- верифицированные результаты расчётов, подтверждённые сравнением с теоретическими данными или альтернативными расчётами;
- первые эскизные рабочие чертежи деталей с основными размерами.

В ходе выполнения курсового проекта студент выполняет расчёт на прочность деталей двигателя, проводит оптимизацию массогабаритных показателей, в результате чего получает верифицированные детали, готовые к производству. На основании приведённых расчётов при необходимости корректируется 3D-модель, после чего на следующем, четвёртом этапе сквозного проекта готовится конструкторская документация и выполняется технологическая подготовка производства. Таким образом, данный курсовой проект является связующим звеном между расчётным обоснованием (термодинамика, динамика) и практической реализацией конструкции (чертежи, технология).

### *Связь с формируемыми компетенциями*

Выполнение курсового проекта направлено на формирование профессиональной компетенции ПК-2: «Способен проводить расчетно-теоретические исследования узлов и систем поршневых двигателей и турбомашин с применением методов математического и компьютерного моделирования (CAE)». В рамках проекта формируются следующие индикаторы достижения:

- ИПК-2.1: способность проводить комбинированный термомеханический анализ детали, работающей в условиях высоких температур и механических нагрузок (например, поршень или выпускной клапан);
- ИПК-2.2: способность выполнять анализ усталостной долговечности детали при циклическом нагружении (например, коленчатый вал или шатун);
- ИПК-2.7: способность выполнять верифицированный прочностной расчёт ответственной детали КШМ в CAE-среде на основе ранее рассчитанных динамических нагрузок.

### *Цель и задачи учебного пособия*

**Цель настоящего пособия** — оказать методическую помощь студенту в выполнении, оформлении и защите курсового проекта по дисциплине «Конструирование и расчет поршневых двигателей» в контексте третьего этапа сквозного проектирования.

**Задачи пособия:**

- разъяснить место и роль курсового проекта в структуре сквозного проектирования;
- дать рекомендации по подготовке исходных данных (3D-модели, динамические нагрузки, свойства материалов);
- изложить требования к содержанию и структуре пояснительной записки и графической части;
- предоставить пошаговые методические указания по проведению конечно-элементного анализа в CAE-системе (ANSYS Workbench);
- описать методику параметрической и топологической оптимизации;
- привести требования к верификации расчётных моделей;
- описать порядок защиты курсового проекта и критерии оценки.

### *Структура пособия*

Пособие состоит из следующих разделов. Введение, в котором описывается место дисциплины в образовательной программе и сквозном проекте. Раздел 1, посвящённый целям, задачам и планируемым результатам курсового проекта. Раздел 2, содержащий требования к содержанию и структуре работы. Раздел 3, в котором приведены примерные темы курсовых проектов. Раздел 4, содержащий методические указания по выполнению работы (пошаговый алгоритм конечно-элементного анализа). Раздел 5, описывающий требования к оформлению пояснительной записки и графической части. Раздел 6, содержащий перечень рекомендуемого программного обеспечения и литературы. Раздел 7, описывающий организацию выполнения и защиты работы, а также критерии оценки. В приложениях приведены образцы

оформления титульного листа, индивидуального задания, а также справочные таблицы свойств материалов.

Пособие предназначено для студентов очной формы обучения по направлению 13.03.03 «Энергетическое машиностроение» и может быть использовано как при выполнении курсового проекта, так и при подготовке к экзаменам и зачётам по дисциплине. Успешное выполнение данного курсового проекта является важнейшим этапом на пути к созданию надёжного, прочного и оптимизированного двигателя, готового к производству и эксплуатации.

# 1. Цели и задачи курсового проекта

## *1.1. Цель выполнения курсового проекта*

Целью курсового проекта по дисциплине «Конструирование и расчет поршневых двигателей» является выполнение прочностного анализа основных деталей кривошипно-шатунного механизма и газораспределительного механизма методом конечных элементов (FEA) с использованием ранее рассчитанных динамических нагрузок, а также проведение параметрической или топологической оптимизации конструкции для улучшения массогабаритных показателей при сохранении требуемого запаса прочности.

Результаты прочностного анализа служат основой для верификации разработанной конструкции, выявления наиболее нагруженных зон, корректировки 3D-моделей и подготовки исходных данных для последующей разработки конструкторской документации и технологической подготовки производства.

## *1.2. Задачи курсового проекта*

Для достижения поставленной цели студент должен решить следующие задачи.

**Первая задача** — подготовить исходные данные для прочностного анализа. Импортировать 3D-модели деталей (шатуна, поршневого пальца, поршня, коленчатого вала) из CAD-системы в CAE-среду. Упростить геометрию моделей для расчёта (удалить мелкие фаски, скругления, отверстия, не влияющие на напряжённо-деформированное состояние). Определить физико-механические свойства материалов деталей (модуль упругости, коэффициент Пуассона, предел текучести, предел прочности, плотность) по справочным данным.

**Вторая задача** — задать граничные условия и нагрузки. На основе результатов динамического расчёта (дисциплина Б1.2.4) определить силы, действующие на детали. Для шатуна: задать силы давления газов и инерционные силы на поршневую и кривошипную головки. Для поршня: задать давление газов на

днище и тепловое поле (при термомеханическом анализе). Для коленчатого вала: задать нагрузки от шатунных шеек и опорные закрепления в коренных подшипниках. Для поршневого пальца: задать распределённую нагрузку от поршня и шатуна.

**Третья задача** — выполнить конечно-элементный анализ. Построить конечно-элементную сетку с контролем качества (аспект-ратио, ортогональность). Провести анализ сходимости результатов при измельчении сетки. Выполнить расчёт и получить поля эквивалентных напряжений по Мизесу, поля деформаций, коэффициенты запаса прочности. Для деталей, работающих при высоких температурах (поршень, выпускной клапан), выполнить термомеханический анализ (связанный расчёт температурных полей и напряжений).

**Четвёртая задача** — выполнить анализ усталостной долговечности. Для деталей, работающих в условиях циклического нагружения (коленчатый вал, шатун), определить коэффициенты запаса прочности по усталости с учётом концентраторов напряжений (галтели, масляные отверстия), масштабного фактора, качества обработки поверхности.

**Пятая задача** — провести оптимизацию конструкции. Выполнить параметрическую оптимизацию (изменение геометрических параметров, таких как толщина стенки поршня, радиус скругления галтели коленчатого вала, сечение стержня шатуна) для улучшения характеристик. При возможности выполнить топологическую оптимизацию (перераспределение материала для минимизации массы при сохранении прочности). Сравнить исходный и оптимизированный варианты, подтвердить эффективность предложенных изменений.

**Шестая задача** — выполнить верификацию расчётных моделей. Сравнить результаты конечно-элементного анализа с аналитическими расчётами (по формулам сопротивления материалов) или с данными из литературных источников. При наличии возможности выполнить расчёт в альтернативной CAE-системе для подтверждения достоверности результатов.

**Седьмая задача** — оформить первые эскизные рабочие чертежи деталей. По результатам прочностного анализа и оптимизации внести изменения в 3D-модели. Оформить эскизные чертежи деталей с основными размерами, допусками и

шероховатостью для последующей разработки конструкторской документации.

### *1.3. Формируемые компетенции и индикаторы их достижения*

В результате выполнения курсового проекта у студента формируется профессиональная компетенция ПК-2: «Способен проводить расчетно-теоретические исследования узлов и систем поршневых двигателей и турбомашин с применением методов математического и компьютерного моделирования (CAE)».

Индикаторы достижения:

- **ИПК-2.1:** студент способен проводить комбинированный термомеханический анализ детали, работающей в условиях высоких температур и механических нагрузок (например, поршень или выпускной клапан). В рамках курсового проекта выполняется тепловой и прочностной анализ поршня с учётом температурного поля.
- **ИПК-2.2:** студент способен выполнять анализ усталостной долговечности детали при циклическом нагружении. В рамках курсового проекта выполняется анализ усталостной долговечности коленчатого вала или шатуна с определением коэффициентов запаса по усталости.
- **ИПК-2.7:** студент способен выполнять верифицированный прочностной расчёт ответственной детали КШМ в CAE-среде на основе ранее рассчитанных динамических нагрузок. В рамках курсового проекта выполняется прочностной анализ шатуна, поршневого пальца или коленчатого вала с верификацией результатов.

### *1.4. Результат выполнения курсового проекта*

По завершении курсового проекта студент представляет следующий комплект материалов.

**Пояснительная записка** объёмом 30–40 страниц, оформленная в соответствии с требованиями ЕСКД. Пояснительная записка включает: титульный лист,

индивидуальное задание, реферат, содержание, введение, описание расчётных моделей и граничных условий, результаты прочностного анализа, результаты оптимизации, верификацию, заключение, список литературы и приложения.

**Графическая часть** включает следующие материалы:

- цветовые карты полей напряжений (эквивалентные напряжения по Мизесу) и деформаций для каждой детали;
- цветовые карты полей температур (при термомеханическом анализе);
- графики сходимости результатов при измельчении сетки;
- сравнительные таблицы исходного и оптимизированного вариантов;
- эскизные рабочие чертежи деталей с основными размерами (форматы А3 или А4).

**Электронный архив** содержит: файлы 3D-моделей в исходном формате CAD-системы и в нейтральных форматах (STEP, Parasolid); файл проекта в CAE-системе (ANSYS Workbench или Simcenter); файл пояснительной записки в форматах .docx и .pdf; файлы с результатами расчётов и графическими материалами.

Все эти материалы являются составной частью отчёта по третьему этапу сквозного проекта «CAE. Расчёты» и служат основой для последующей корректировки 3D-моделей, разработки конструкторской документации (этап 4) и технологической подготовки производства.

# 2. Требования к содержанию и структуре работы

## *2.1. Примерный перечень тем курсовых проектов*

Тематика курсовых проектов по дисциплине «Конструирование и расчет поршневых двигателей» формируется в зависимости от типа двигателя и конкретной детали или узла, подлежащего прочностному анализу. Студент выполняет расчёт для двигателя, 3D-модель которого была создана на втором этапе сквозного проекта, а динамические нагрузки получены на третьем этапе. Ниже приведён примерный перечень тем.

**По шатуну:**

- Прочностной анализ и оптимизация шатуна рядного четырёхцилиндрового бензинового двигателя.
- Прочностной анализ и оптимизация шатуна дизельного двигателя с учётом усталостной долговечности.
- Термомеханический анализ верхней головки шатуна с запрессованной втулкой.

**По поршню:**

- Термомеханический анализ поршня бензинового двигателя с оптимизацией формы днища.
- Прочностной анализ поршня дизельного двигателя с охлаждаемыми масляными каналами.
- Анализ напряжённо-деформированного состояния поршневых колец и их влияние на работоспособность.

**По поршневому пальцу:**

- Прочностной анализ поршневого пальца плавающего типа с оценкой овализации.
- Оптимизация поршневого пальца по критерию минимальной массы при сохранении прочности.

**По коленчатому валу:**

- Прочностной анализ и усталостная долговечность коленчатого вала рядного двигателя.
- Анализ напряжённо-деформированного состояния коленчатого вала с учётом крутильных колебаний.
- Оптимизация галтелей коленчатого вала для снижения концентрации напряжений.

**По поршневой группе в сборе:**

- Комплексный прочностной анализ поршневой группы (поршень, палец, шатун) с учётом взаимодействия деталей.

### *2.2. Структура пояснительной записки*

Пояснительная записка курсового проекта оформляется на листах формата А4 и должна иметь следующую структуру.

**Титульный лист** содержит наименование университета, факультета, кафедры, тему курсового проекта, сведения о студенте и руководителе, город и год выполнения, а также гриф «К защите на этапе 3 сквозного проекта».

**Индивидуальное задание** выдаётся руководителем и содержит перечень подлежащих разработке вопросов, исходные данные (тип двигателя, деталь для расчёта, нагрузки из динамического расчёта, свойства материалов), сроки выполнения и требования к результатам.

**Реферат** (500–800 знаков) содержит ключевые слова, цель работы, краткое содержание, основные результаты (коэффициенты запаса прочности, снижение массы после оптимизации).

**Содержание** включает наименования всех разделов и подразделов с указанием страниц.

**Введение** содержит обоснование актуальности, формулировку цели и задач, краткую характеристику структуры работы.

**Глава 1. Исходные данные и подготовка расчётных моделей** включает: описание 3D-моделей деталей; упрощение геометрии для CAE-анализа; свойства материалов; нагрузки и граничные условия из динамического расчёта.

**Глава 2. Конечно-элементный анализ** включает: построение конечно-элементной сетки; анализ сходимости; результаты прочностного расчёта (поля напряжений, деформаций, коэффициенты запаса прочности); анализ наиболее нагруженных зон.

**Глава 3. Анализ усталостной долговечности** (при необходимости) включает: определение коэффициентов запаса по усталости с учётом концентраторов напряжений, масштабного фактора, качества обработки поверхности.

**Глава 4. Оптимизация конструкции** включает: параметрическую или топологическую оптимизацию; сравнение исходного и оптимизированного вариантов; рекомендации по изменению геометрии.

**Глава 5. Верификация результатов** включает: сравнение с аналитическими расчётами или литературными данными; при возможности — сравнение с расчётом в альтернативной CAE-системе.

**Заключение** содержит краткие выводы по результатам работы, оценку достижения цели, рекомендации по корректировке

3D-моделей для последующей разработки конструкторской документации.

**Список литературы** включает все использованные источники (не менее 10–15 наименований).

**Приложения** содержат таблицы с исходными данными, дополнительные графики и цветовые карты.

### *2.3. Состав графической части*

Графическая часть курсового проекта включает:

- цветовые карты полей эквивалентных напряжений по Мизесу для каждой детали;
- цветовые карты полей деформаций;
- цветовые карты полей температур (при термомеханическом анализе);
- графики сходимости результатов при измельчении сетки;
- сравнительные диаграммы исходного и оптимизированного вариантов;
- эскизные рабочие чертежи деталей с основными размерами (форматы А3 или А4).

## 3. Исходные данные и их получение

### *3.1. Источники исходных данных*

Для успешного выполнения курсового проекта по дисциплине «Конструирование и расчет поршневых двигателей» студенту необходимо получить и проанализировать исходные данные, которые поступают из нескольких источников, прежде всего из предыдущих этапов сквозного проекта.

**Первым источником являются результаты предыдущих этапов сквозного проекта.** Из курсового проекта по дисциплине «Автоматизированное проектирование в двигателестроении» (Б1.1.12) используются 3D-модели деталей кривошипно-шатунного механизма (шатун, поршень, поршневой палец, коленчатый вал) в исходных форматах CAD-системы (КОМПАС-

3D, SolidWorks). Эти модели служат основой для построения конечно-элементных моделей. Из курсового проекта по дисциплине «Динамический расчет поршневых двигателей» (Б1.2.4) используются силы, действующие на детали: тангенциальная и радиальная составляющие силы, действующей на шатунную шейку; силы, действующие на поршневой палец; силы давления газов. Из курсовой работы по дисциплине «Теория рабочих процессов поршневых двигателей» (Б1.1.20) используются давление газов в цилиндре как функция угла поворота коленчатого вала, а также температура газов в цилиндре (для термомеханического анализа поршня).

**Вторым источником являются дисциплины, изучаемые на предыдущих курсах.** Дисциплина «Сопротивление материалов» (Б1.1.15) даёт методы расчёта напряжений и деформаций, теорию усталостной прочности, методы определения коэффициентов запаса. Дисциплина «Конструкционные материалы поршневых двигателей и турбомашин» (Б1.1.13) предоставляет данные о физико-механических свойствах материалов (модуль упругости, коэффициент Пуассона, предел текучести, предел прочности, предел выносливости) для чугунов, сталей, алюминиевых сплавов. Дисциплина «Нормирование точности и метрология» (Б1.1.14) используется при назначении допусков и посадок на эскизных чертежах. Дисциплина «Термодинамика» и «Теплообмен» используются для определения температурных полей в поршне.

**Третьим источником является учебная и справочная литература.** Студент должен использовать справочники по механическим свойствам материалов, справочники по концентраторам напряжений (коэффициенты $K_t, K_\sigma$), справочники по масштабному фактору и фактору качества поверхности.

**Четвёртым источником (при наличии) могут быть данные с предприятия-партнёра.** Для студентов, проходящих практику на предприятиях-партнёрах, исходными данными могут служить реальные нагрузки, свойства материалов, требования к коэффициентам запаса прочности, принятые на предприятии.

### *3.2. Связь с предшествующими дисциплинами*

Выполнение курсового проекта опирается на результаты, полученные студентом при изучении следующих дисциплин.

**Б1.1.12 «Автоматизированное проектирование в двигателестроении»** — 3D-модели деталей КШМ в форматах STEP, Parasolid для импорта в CAE-систему.

**Б1.2.4 «Динамический расчет поршневых двигателей»** — силы, действующие на шатунную шейку (тангенциальная $T$ и радиальная $K$), силы на поршневой палец, силы давления газов $P_Г$.

**Б1.1.20 «Теория рабочих процессов поршневых двигателей»** — давление газов в цилиндре $p = f(\varphi)$, температура газов $T_Г = f(\varphi)$.

**Б1.1.13 «Конструкционные материалы»** — свойства материалов: для поршня — алюминиевый сплав ($E$ = 70 ГПа, $\nu$ = 0,33, $\sigma_T$= 250 МПа, $\sigma_B$ = 350 МПа); для шатуна — сталь 40Х ($E$ = 200 ГПа, $\nu$ = 0,3, $\sigma_T$= 785 МПа, $\sigma_B$ = 980 МПа); для коленчатого вала — сталь 40ХН2МА ($E$ = 205 ГПа, $\nu$ = 0,3, $\sigma_T$= 880 МПа, $\sigma_B$ = 1080 МПа).

**Б1.1.15 «Сопротивление материалов»** — методы расчёта напряжений, теория усталостной прочности, концентраторы напряжений.

### *3.3. Порядок получения индивидуального задания и согласования темы*

**Первый этап — получение исходных данных из предыдущих этапов.** В начале шестого семестра студент должен иметь завершённые результаты: 3D-модели деталей (из Б1.1.12), таблицы динамических нагрузок (из Б1.2.4), индикаторную диаграмму (из Б1.1.20). Эти материалы предоставляются руководителю.

**Второй этап — выбор детали для расчёта.** На основе анализа предыдущих этапов студент совместно с руководителем выбирает одну или несколько деталей для прочностного анализа (шатун, поршневой палец, поршень, коленчатый вал). Выбор зависит от темы сквозного проекта.

**Третий этап — согласование исходных данных.** Все исходные данные (нагрузки, свойства материалов, граничные условия) согласовываются с руководителем.

**Четвёртый этап — утверждение задания.** Индивидуальное задание подписывается студентом и руководителем, утверждается заведующим кафедрой.

# 4. Методические указания по выполнению курсового проекта

Данный раздел является основным в пособии. Он содержит пошаговое описание выполнения прочностного анализа методом конечных элементов в CAE-системе ANSYS Workbench.

## *4.1. Подготовительный этап*

**Анализ исходных данных.** Собрать все исходные данные: 3D-модели деталей (формат STEP или Parasolid); таблицы динамических нагрузок ($T = f(\varphi)$, $K = f(\varphi)$, $P_\Gamma = f(\varphi)$); свойства материалов ($E$, $\nu$, $\sigma_T$, $\sigma_B$, $\sigma_{-1}$). Проверить, что нагрузки соответствуют расчётному режиму (обычно режим максимального крутящего момента или режим максимальной мощности).

**Изучение литературы.** Изучить литературу по конечно-элементному анализу, ANSYS Workbench, усталостной прочности.

**Составление плана работы.** План должен включать: импорт моделей, упрощение геометрии, задание свойств материалов, построение сетки, задание граничных условий, расчёт, оптимизацию, верификацию.

## *4.2. Импорт и подготовка геометрии*

**Импорт 3D-модели.** В ANSYS Workbench создаётся новый проект Static Structural. В разделе Geometry импортируется файл модели (STEP или Parasolid). Важно убедиться, что модель импортировалась без ошибок.

**Упрощение геометрии.** Для CAE-анализа необходимо упростить геометрию: подавить или удалить мелкие фаски (радиусом менее 1 мм), мелкие отверстия (диаметром менее 2 мм), резьбы, элементы, не влияющие на напряжённо-деформированное

состояние. В ANSYS Workbench это выполняется в модуле SpaceClaim или DesignModeler. Пример для шатуна: удалить фаски на кромках, не являющихся концентраторами напряжений; упростить масляные каналы.

### *4.3. Задание свойств материалов*

В разделе Engineering Data задаются свойства материалов:

- Модуль упругости $E$ (МПа)
- Коэффициент Пуассона $\nu$
- Предел текучести $\sigma_T$ (МПа)
- Предел прочности $\sigma_B$ (МПа)
- Предел выносливости $\sigma_{-1}$ (МПа) (для усталостного анализа)
- Плотность $\rho$ (кг/м³)
- Коэффициент теплопроводности $\lambda$ (Вт/(м·К)) (для термомеханического анализа)
- Коэффициент линейного расширения $\alpha$ (1/К) (для термомеханического анализа)

Пример для стали 40Х: $E$ = $2{,}0e^5$МПа, $\nu$ = 0,3, $\sigma_T$ = 785 МПа, $\sigma_B$ = 980 МПа, $\sigma_{-1}$ = 380 МПа, $\rho$ = 7800 кг/м³.

### *4.4. Построение конечно-элементной сетки*

В разделе Mesh строится конечно-элементная сетка. Выбирается тип элементов: тетраэдры (Tetrahedrons) для сложной геометрии, гексаэдры (Hex Dominant) для простой геометрии. Задаётся размер элемента (Relevance Center — Medium, Element Size — 2–5 мм в зависимости от размера детали). В зонах концентрации напряжений (галтели, отверстия) выполняется локальное сгущение сетки (Body Sizing с меньшим размером элемента, 0,5–1 мм). Проверяется качество сетки: аспект-ратио (отношение максимального размера элемента к минимальному) не более 10, ортогональность (отклонение от 90°) не более 70°.

**Анализ сходимости.** Для проверки достоверности результатов выполняется анализ сходимости: расчёт выполняется для трёх вариантов сетки (грубая, средняя, мелкая). Если разница

в максимальных напряжениях между средней и мелкой сеткой составляет менее 5%, сетка считается приемлемой.

### *4.5. Задание граничных условий и нагрузок*

**Задание закреплений.** В разделе Static Structural задаются закрепления в соответствии с реальными условиями работы детали. Для шатуна: закрепление нижней головки (цилиндрическая опора с возможностью вращения), нагрузка на верхнюю головку. Для поршня: закрепление по оси пальца (симметрия), давление на днище. Для коленчатого вала: закрепление коренных шеек (опоры), нагрузка на шатунные шейки.

**Задание нагрузок.** Нагрузки задаются на основе динамического расчёта. Для шатуна: сила на верхнюю головку $P_\Sigma = P_Г + P_i$, кН. Для поршневого пальца: распределённая нагрузка от поршня и шатуна. Для коленчатого вала: тангенциальная $T$ и радиальная $K$ силы, приложенные к шатунной шейке.

### *4.6. Прочностной анализ (FEA)*

После задания всех условий выполняется расчёт (Solve). Получаются следующие результаты.

**Эквивалентные напряжения по Мизесу ($\sigma_{экв}$).** Цветовая карта показывает распределение напряжений по детали. Наиболее нагруженные зоны выделяются красным/жёлтым цветом. Для шатуна опасные зоны: переход от стержня к верхней головке, галтели нижней головки. Для поршня: днище, перемычки между кольцами, бобышки. Для коленчатого вала: галтели шатунных и коренных шеек, масляные отверстия.

**Коэффициент запаса прочности (Safety Factor).** Коэффициент запаса определяется как $\sigma_T / \sigma_{экв.макс.}$ Нормативные значения: для стальных деталей $[n] = 1{,}5 \dots 2{,}5$; для алюминиевых поршней $[n] = 1{,}2 \dots 1{,}8$. Если полученный коэффициент запаса ниже нормативного, необходимо изменить

геометрию (увеличить радиусы скруглений, добавить рёбра жёсткости, увеличить толщину стенки).

**Деформации (Total Deformation).** Цветовая карта показывает распределение деформаций. Деформации не должны приводить к заклиниванию сопряжённых деталей.

### *4.7. Анализ усталостной долговечности*

Для деталей, работающих в условиях циклического нагружения (коленчатый вал, шатун), выполняется усталостный анализ в модуле Fatigue Tool. Задаются: коэффициент концентрации напряжений $K_t$ (для галтелей $K_t = 2{,}0 \dots 3{,}5$, для масляных отверстий $K_t = 2{,}5 \dots 4{,}0$), масштабный фактор $K_d$ (для валов диаметром 50–100 мм $K_d = 0{,}6 \dots 0{,}8$), фактор качества поверхности $K_f$ (для шлифования $K_f = 0{,}9 \dots 0{,}95$, для полирования $K_f = 0{,}95 \dots 1{,}0$). Определяется коэффициент запаса по усталости $n_\sigma = \sigma_{-1} / \left(\sigma_\alpha \cdot K_\sigma / \left(K_d \cdot K_f\right)\right)$. Нормативное значение $n_\sigma = 1{,}5 \dots 2{,}5$.

### *4.8. Оптимизация конструкции*

**Параметрическая оптимизация.** В ANSYS Workbench создаются параметры (толщина стенки поршня, радиус скругления галтели, размеры сечения шатуна). Запускается модуль DesignXplorer, задаются целевая функция (минимизация массы или максимизация прочности) и ограничения (коэффициент запаса ≥ нормативного). Проводится серия расчётов, строится график зависимости напряжений от параметров. Выбирается оптимальное значение.

**Топологическая оптимизация.** В модуле Topology Optimization задаётся целевое снижение массы (например, 30%). Программа автоматически удаляет материал в ненагруженных зонах. После оптимизации экспортируется новая геометрия, выполняется повторный прочностной расчёт. Сравниваются исходный и оптимизированный варианты по массе и максимальным напряжениям.

### *4.9. Верификация расчётных моделей*

Верификация проводится путём сравнения результатов конечно-элементного анализа с аналитическими расчётами. Для шатуна: по формуле сопротивления материалов $\sigma = P / F + M / W$, где P — сила, F — площадь сечения, M — изгибающий момент, W — момент сопротивления. Расхождение не должно превышать 15–20%. При наличии возможности выполняется расчёт в альтернативной CAE-системе (Simcenter) и сравниваются результаты.

### *4.10. Типичные ошибки и способы их предотвращения*

**Ошибка:** Неправильное задание граничных условий (закрепления не соответствуют реальной работе детали). **Как избежать:** Проконсультироваться с руководителем, изучить аналоги.

**Ошибка:** Слишком грубая сетка, приводящая к завышению напряжений. **Как избежать:** Выполнить анализ сходимости.

**Ошибка:** Игнорирование концентраторов напряжений (галтелей, отверстий). **Как избежать:** Учесть их в модели и в усталостном анализе.

**Ошибка:** Неправильный выбор материала или его свойств. **Как избежать:** Использовать справочные данные.

**Ошибка:** Отсутствие верификации результатов. **Как избежать:** Сравнить с аналитическим расчётом.

## 5. Требования к оформлению пояснительной записки

### *5.1. Общие требования к оформлению*

Пояснительная записка курсового проекта является текстовым документом, который оформляется в соответствии с требованиями Единой системы конструкторской документации (ЕСКД) и локальными нормативными актами Московского

политехнического университета. Соблюдение изложенных ниже требований является обязательным. Небрежно оформленная записка может быть возвращена на доработку даже при правильном содержании.

**Формат и поля.** Пояснительная записка выполняется на листах белой бумаги формата А4 (297×210 мм). Текст печатается на одной стороне листа. Поля страницы должны иметь следующие размеры: левое поле — 30 мм (для подшивки), правое поле — 10 мм, верхнее поле — 15 мм, нижнее поле — 20 мм.

**Шрифты и межстрочный интервал.** Основной текст печатается шрифтом Times New Roman, 14 кегль, полуторный межстрочный интервал. Цвет шрифта — чёрный. Допускается использование шрифтов других гарнитур в таблицах и приложениях, но при этом должен обеспечиваться хороший контраст и читаемость.

**Выравнивание текста.** Основной текст выравнивается по ширине страницы. Заголовки выравниваются по центру. Абзацный отступ (красная строка) должен быть одинаковым по всему тексту и составлять 1,25 см. Отступ задаётся средствами текстового редактора, использование пробелов для создания абзацного отступа не допускается.

**Нумерация страниц.** Страницы пояснительной записки нумеруются сквозной нумерацией арабскими цифрами. Номер страницы проставляется в правом верхнем углу без точки, без дополнительных знаков (тире, скобок). Титульный лист включается в общую нумерацию, но номер страницы на нём не проставляется. Нумерация начинается со второй страницы (номер 2). Приложения включаются в общую нумерацию страниц.

### *5.2. Оформление текста*

**Заголовки.** Заголовки разделов (например, «Введение», «Глава 1. Исходные данные и подготовка расчётных моделей», «Заключение», «Список литературы») печатаются полужирным шрифтом, 14 кегль, по центру строки. Точка в конце заголовка не ставится. Заголовки отделяются от последующего текста одной пустой строкой. Заголовки подразделов печатаются полужирным

шрифтом, 14 кегль, с абзацного отступа. Переносы слов в заголовках не допускаются.

**Абзацы и отступы.** Каждый абзац начинается с красной строки (абзацный отступ 1,25 см). Интервал между абзацами не устанавливается (регулируется полуторным межстрочным интервалом). Не допускается использование пустых строк между абзацами внутри одного раздела.

**Списки.** Перечисления оформляются в виде маркированных или нумерованных списков. Маркеры списков — тире или кружки. При нумерации используются арабские цифры с точкой. Каждый пункт списка начинается с новой строки. После маркера или номера ставится пробел.

**Выделения в тексте.** Важные термины, названия, ключевые слова могут быть выделены полужирным шрифтом или курсивом. Подчёркивание текста не допускается. Цветные выделения не допускаются (за исключением цветных иллюстраций).

### *5.3. Оформление иллюстраций (рисунков)*

**Виды иллюстраций.** В пояснительной записке могут быть представлены: цветовые карты полей напряжений, деформаций, температур; графики сходимости сетки; диаграммы сравнения исходного и оптимизированного вариантов; скриншоты интерфейса CAE-системы. Все иллюстрации именуются рисунками.

**Нумерация рисунков.** Рисунки нумеруются арабскими цифрами в пределах раздела (рисунок 1.1, рисунок 1.2, рисунок 2.1 и т.д.).

**Подписи рисунков.** Подпись располагается под рисунком по центру строки. Подпись начинается со слова «Рисунок» (без сокращений), затем указывается номер рисунка, затем ставится тире и приводится наименование рисунка. Точка в конце подписи не ставится. Пример: «Рисунок 2.1 — Поле эквивалентных напряжений по Мизесу в шатуне».

**Ссылки на рисунки в тексте.** В тексте записки должны быть ссылки на все рисунки. Ссылка оформляется в виде «(рисунок 2.1)» или «как показано на рисунке 2.1».

### *5.4. Оформление таблиц*

**Нумерация таблиц.** Таблицы нумеруются арабскими цифрами в пределах раздела (таблица 1.1, таблица 1.2, таблица 2.1 и т.д.).

**Заголовок таблицы.** Каждая таблица должна иметь заголовок, который располагается над таблицей слева, без абзацного отступа. Заголовок начинается со слова «Таблица», затем указывается номер таблицы, затем ставится тире и приводится наименование таблицы. Пример: «Таблица 1.1 — Свойства материалов деталей».

**Оформление шапки таблицы.** Заголовки граф печатаются полужирным шрифтом, выравниваются по центру. Единицы измерения указываются в заголовках граф после запятой.

**Ссылки на таблицы в тексте.** В тексте записки должны быть ссылки на все таблицы в виде «(таблица 1.1)».

### *5.5. Оформление формул*

Формулы набираются с использованием редактора формул. Формулы нумеруются арабскими цифрами в пределах раздела (1.1, 1.2, 2.1 и т.д.). Номер указывается в круглых скобках у правого края строки. Пояснения символов приводятся после формулы под словом «где». Пример:

$$\sigma_{\text{экв}} = \sqrt{(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 - \sigma_x \times \sigma_y - \sigma_y \times \sigma_z - \sigma_z \times \sigma_x + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2))} \qquad (2.1)$$

где $\sigma_{\text{экв}}$ — эквивалентное напряжение по Мизесу, МПа; $\sigma_x$, $\sigma_y$, $\sigma_z$— нормальные напряжения, МПа; $\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$ — касательные напряжения, МПа.

### *5.6. Оформление ссылок и списка литературы*

Ссылки на литературу в тексте оформляются в квадратных скобках [1, с. 44]. Список литературы оформляется в алфавитном порядке по ГОСТ 7.1-2003.

### *5.7. Оформление приложений*

Приложения содержат вспомогательные материалы: таблицы с исходными данными, дополнительные цветовые карты, распечатки результатов расчёта. Каждое приложение начинается с новой страницы с обозначением (Приложение А, Приложение Б).

## 6. Требования к оформлению графической части

### *6.1. Состав графической части*

Графическая часть курсового проекта включает:

- цветовые карты полей эквивалентных напряжений по Мизесу для каждой детали (не менее 2–3 цветовых карт);
- цветовые карты полей деформаций;
- цветовые карты полей температур (при термомеханическом анализе);
- графики сходимости результатов при измельчении сетки;
- сравнительные диаграммы исходного и оптимизированного вариантов (масса, максимальные напряжения);
- эскизные рабочие чертежи деталей с основными размерами (форматы А3 или А4).

### *6.2. Требования к цветовым картам*

Цветовые карты должны быть чёткими, с подписанной шкалой напряжений (минимальное и максимальное значение). Масштаб должен обеспечивать читаемость. Рекомендуется использовать цветовую схему «от синего к красному» (синий — минимальные напряжения, красный — максимальные). На карте должны быть отмечены зоны максимальных напряжений.

### *6.3. Требования к эскизным рабочим чертежам*

Эскизные рабочие чертежи деталей выполняются на форматах А3 или А4. На чертежах должны быть указаны: основные размеры после оптимизации; допуски на сопрягаемые поверхности; шероховатость; материал; технические требования. Чертёж должен содержать основную надпись по форме 2 или 2а ГОСТ 2.104.

### *6.4. Требования к презентации*

При защите курсового проекта рекомендуется подготовить презентацию (10–14 слайдов). Структура презентации: титульный слайд; цель и задачи; расчётная модель и граничные условия; цветовые карты напряжений и деформаций; результаты оптимизации; верификация; выводы. Оформление: единый стиль, светлый фон, тёмный текст, шрифт для заголовков 28–32 пункта, для основного текста 20–24 пункта.

## 7. Программное обеспечение и инструменты

### *7.1. Основное программное обеспечение*

Для выполнения курсового проекта по дисциплине «Конструирование и расчет поршневых двигателей» студенту необходимо освоить CAE-систему для проведения конечно-элементного анализа. Основным рекомендуемым программным обеспечением является **ANSYS Workbench**.

**ANSYS Workbench (актуальная версия, предоставляемая университетом).** Это интегрированная среда для многодисциплинарного инженерного анализа. В рамках курсового проекта используются следующие модули:

- **Static Structural** — для статического прочностного расчёта деталей при действии механических нагрузок. Позволяет получить поля напряжений, деформаций, коэффициенты запаса прочности.
- **Modal** — для модального анализа (определения собственных частот и форм колебаний) при необходимости.

- **Thermal** — для теплового анализа (расчёт полей температур) при термомеханическом анализе поршня.
- **Fatigue Tool** — для анализа усталостной долговечности при циклическом нагружении.
- **Topology Optimization** — для топологической оптимизации (перераспределение материала для снижения массы).
- **DesignXplorer** — для параметрической оптимизации (изменение геометрических параметров).

Студенческая версия ANSYS Student доступна для бесплатного скачивания на официальном сайте ANSYS (требуется регистрация с использованием университетской электронной почты). Версия имеет ограничения по размеру модели (до 512 тыс. узлов), что достаточно для выполнения курсового проекта.

**Альтернативные CAE-системы (по выбору студента или рекомендации руководителя):**

- **Siemens Simcenter 3D** — профессиональная CAE-система, интегрированная с NX. Позволяет выполнять прочностной, тепловой, усталостный анализ. Доступна в компьютерных классах кафедры.
- **КОМПАС-3D (модуль АРМ FEM)** — встроенный модуль конечно-элементного анализа в КОМПАС-3D. Может быть использован для простых расчётов.

**CAD-системы для импорта 3D-моделей:**

- **КОМПАС-3D** (v20 или выше) — для экспорта моделей в форматы STEP, Parasolid.
- **SolidWorks** (2022 Education Edition или выше) — для экспорта моделей.

### *7.2. Вспомогательное программное обеспечение*

**Microsoft Office (Word, Excel, PowerPoint) или LibreOffice.** Для оформления пояснительной записки, обработки результатов расчётов (Excel), подготовки презентации.

**Adobe Acrobat Reader** — для просмотра файлов в формате PDF.

**PDF-принтер** — для конвертации документов в PDF.

**Архиватор (7-Zip, WinRAR)** — для упаковки электронного архива.

### *7.3. Учебные ресурсы по программному обеспечению*

**По ANSYS Workbench:**

- Официальная документация ANSYS Workbench (User‘s Guide, DesignXplorer User’s Guide, Fatigue User‘s Guide) — доступна в программе и на сайте поддержки ANSYS.
- ANSYS Learning Resources — официальные учебные материалы и видеоуроки: https://www.ansys.com/training-center.
- Встроенные учебные примеры (Tutorials) — доступны через меню Help.

**По Siemens Simcenter 3D:**

- Официальная документация Simcenter.
- Siemens Xcelerator Academy — онлайн-курсы для студентов.

**По конечно-элементному анализу в целом:**

- Учебное пособие «Основы конечно-элементного анализа в ANSYS Workbench» (кафедральные методические указания).
- Книга «ANSYS Workbench для студентов и инженеров» (Басов К.А.).

### *7.4. Требования к форматам сдаваемых файлов*

Все материалы курсового проекта сдаются в электронном виде. Состав и форматы файлов:

- **Пояснительная записка:** файл в исходном формате (.docx) и в формате .pdf.
- **Графические материалы (цветовые карты, графики):** файлы в форматах .pdf, .jpg или .png (допускается включение в пояснительную записку).
- **Файлы CAE-проекта:** файл проекта ANSYS Workbench (.wbpj) с папкой _files (или экспортированные результаты в .txt/.csv).
- **3D-модели:** файлы в нейтральных форматах STEP (.stp) или Parasolid (.x_t) для верификации.
- **Презентация (при наличии):** файл в формате .pptx и .pdf.

### *7.5. Структура электронного архива*

Корневая папка называется по фамилии студента и номеру группы (например, «Иванов_241-111_Б1.2.8»). Внутри располагаются папки:

- «Report» — пояснительная записка (.docx, .pdf);
- «CAE» — файлы проекта ANSYS (.wbpj и папка _files), экспортированные результаты;
- «CAD» — 3D-модели в форматах STEP, Parasolid;
- «Graphics» — цветовые карты, графики в форматах .pdf, .jpg;
- «Presentation» — презентация (при наличии).

Все файлы должны быть названы в соответствии с их содержанием. Недопустимы названия типа «расчет.wbpj», «график.jpg». Пример правильного названия: «Шатун_прочностной_анализ_Иванов.wbpj», «Поле_напряжений_шатун_Иванов.pdf».

Перед сдачей все файлы должны быть проверены на открываемость. Студент обязан иметь резервную копию всех материалов.

# 8. Организация выполнения и защиты курсового проекта

## *8.1. Календарный план выполнения курсового проекта*

Курсовой проект выполняется в шестом семестре. Рекомендуемый календарный план (18 недель):

**1–2 недели.** Получение индивидуального задания, сбор исходных данных (3D-модели, динамические нагрузки, свойства материалов), подбор литературы.

**3–4 недели.** Импорт 3D-моделей в CAE-систему, упрощение геометрии, задание свойств материалов.

**5–6 недели.** Построение конечно-элементной сетки, контроль качества сетки, анализ сходимости.

**7–8 недели.** Задание граничных условий и нагрузок (на основе динамического расчёта), выполнение первого расчёта.

**9–10 недели.** Анализ результатов: поля напряжений, деформаций, коэффициенты запаса прочности. Выявление наиболее нагруженных зон. При необходимости — корректировка модели.

**11–12 недели.** Выполнение усталостного анализа (для коленчатого вала или шатуна). Определение коэффициентов запаса по усталости.

**13–14 недели.** Проведение параметрической или топологической оптимизации. Сравнение исходного и оптимизированного вариантов.

**15–16 недели.** Верификация результатов (сравнение с аналитическим расчётом или альтернативной CAE-системой). Оформление эскизных рабочих чертежей.

**17–18 недели.** Оформление пояснительной записки, подготовка графических материалов, сдача работы на проверку, нормоконтроль, защита курсового проекта.

### *8.2. Взаимодействие с руководителем*

Консультации с руководителем проводятся не реже одного раза в две недели, а в периоды интенсивной работы (7–14 недели) — еженедельно. Формы промежуточной отчётности:

- 4 неделя: проверка импортированных моделей и заданных свойств материалов;
- 6 неделя: проверка конечно-элементной сетки и сходимости;
- 8 неделя: проверка граничных условий и первого расчёта;
- 10 неделя: проверка результатов прочностного анализа;
- 12 неделя: проверка усталостного анализа;
- 14 неделя: проверка оптимизации;
- 16 неделя: проверка верификации и эскизных чертежей;
- 18 неделя: проверка пояснительной записки.

Результаты каждой проверки фиксируются в рабочем дневнике студента.

### *8.3. Порядок сдачи курсового проекта*

После завершения всех этапов работы и устранения замечаний руководителя студент проходит нормоконтроль. Нормоконтролёр проверяет соответствие оформления пояснительной записки и графических материалов требованиям ЕСКД.

Для сдачи курсового проекта студент предоставляет:

- пояснительную записку в сброшюрованном виде (распечатанную и подписанную) и в электронном виде;
- графические материалы (цветовые карты, графики, эскизные чертежи) в распечатанном виде и в электронном виде;
- файлы CAE-проекта на электронном носителе;
- электронный архив с полной структурой папок.

Срок сдачи устанавливается кафедрой и указывается в индивидуальном задании.

### *8.4. Защита курсового проекта*

Защита проводится в форме дифференцированного зачёта. Продолжительность защиты — 10–15 минут.

**Порядок защиты.** Студент выступает с докладом (5–7 минут), в котором освещает: цель и задачи проекта; выбранную деталь для расчёта; исходные данные (нагрузки из динамического расчёта, свойства материалов); построение конечно-элементной сетки; основные результаты прочностного анализа (максимальные напряжения, коэффициент запаса, опасные зоны); результаты оптимизации (снижение массы, изменение напряжений); верификацию; выводы и рекомендации по корректировке 3D-моделей. Доклад сопровождается презентацией (10–14 слайдов) с цветовыми картами напряжений и деформаций.

После доклада руководитель (или члены комиссии) задают вопросы. Вопросы могут касаться: выбора расчётного режима; задания граничных условий; интерпретации цветовых карт; концентраторов напряжений; методов оптимизации; усталостной

долговечности; верификации результатов; связи с последующими этапами сквозного проекта (разработка КД, технология).

### *8.5. Критерии оценки*

**Оценка «отлично»** — задание выполнено в полном объёме и в срок, конечно-элементная сетка построена с анализом сходимости, граничные условия заданы корректно, результаты верифицированы, оптимизация выполнена и обоснована, пояснительная записка оформлена безупречно, студент глубоко понимает материал.

**Оценка «хорошо»** — задание выполнено, есть незначительные замечания (неполный анализ сходимости, незначительные ошибки в задании нагрузок, небольшие недочёты в оформлении).

**Оценка «удовлетворительно»** — задание выполнено, но имеются существенные замечания (грубая сетка без сходимости, неверное задание граничных условий, отсутствие оптимизации или верификации), студент отвечает с трудом.

**Оценка «неудовлетворительно»** — задание не выполнено или выполнено с грубыми нарушениями (отсутствует расчёт, нет цветовых карт, не обоснованы коэффициенты запаса).

## 9. Критерии оценки курсового проекта

Оценка курсового проекта по дисциплине «Конструирование и расчет поршневых двигателей» осуществляется по четырёхбалльной шкале: «отлично», «хорошо», «удовлетворительно», «неудовлетворительно». При выставлении оценки учитываются качество выполнения конечно-элементного анализа, правильность задания граничных условий, обоснованность выбора расчётных режимов, качество оптимизации, полнота верификации, соблюдение сроков выполнения этапов, а также уровень понимания методов прочностного анализа, демонстрируемый студентом при защите.

### *9.1. Оценка «отлично»*

Оценка «отлично» выставляется при выполнении следующих условий.

Задание выполнено в полном объёме и в установленный календарным планом срок. 3D-модели деталей корректно импортированы в CAE-среду, геометрия упрощена рационально (удалены мелкие элементы, не влияющие на напряжённо-деформированное состояние). Конечно-элементная сетка построена с контролем качества (аспект-ратио, ортогональность), выполнен анализ сходимости результатов при измельчении сетки, подтверждающий достоверность расчёта.

Граничные условия и нагрузки заданы корректно на основе результатов динамического расчёта (силы, действующие на шатунную шейку, поршневой палец). Свойства материалов (модуль упругости, коэффициент Пуассона, предел текучести, предел выносливости) выбраны в соответствии со справочными данными и обоснованы.

Результаты прочностного анализа (поля эквивалентных напряжений по Мизесу, деформации, коэффициенты запаса прочности) получены и проанализированы. Выявлены наиболее нагруженные зоны, даны рекомендации по изменению конструкции. Коэффициенты запаса прочности соответствуют нормативным значениям (для стальных деталей $[n] = 1{,}5 \dots 2{,}5$, для алюминиевых $[n] = 1{,}2 \dots 1{,}8$).

При необходимости выполнен усталостный анализ с учётом концентраторов напряжений, масштабного фактора и качества обработки поверхности. Коэффициенты запаса по усталости соответствуют нормативным значениям.

Проведена параметрическая или топологическая оптимизация конструкции. Представлено сравнение исходного и оптимизированного вариантов (масса, максимальные напряжения). Достигнуто снижение массы не менее чем на 10–15% при сохранении требуемого запаса прочности. Выполнена верификация результатов путём сравнения с аналитическим расчётом (расхождение не более 15–20%) или с расчётом в альтернативной CAE-системе.

Пояснительная записка оформлена безупречно в соответствии с требованиями ЕСКД. Цветовые карты напряжений и деформаций имеют подписи, шкалы, ссылки в тексте. При защите студент демонстрирует глубокое понимание методов конечно-элементного анализа, свободно объясняет выбор граничных условий, интерпретирует цветовые карты, аргументированно отвечает на все вопросы, показывает понимание связи данной работы с последующими этапами сквозного проекта (корректировка 3D-моделей, разработка конструкторской документации, технологическая подготовка производства).

### *9.2. Оценка «хорошо»*

Оценка «хорошо» выставляется при выполнении следующих условий.

Задание выполнено в полном объёме, в установленный срок. Однако имеются незначительные замечания по содержанию или оформлению.

К незначительным замечаниям могут относиться: упрощение геометрии выполнено не в полном объёме (оставлены мелкие элементы, не влияющие на расчёт, но усложняющие сетку); анализ сходимости сетки выполнен не для всех вариантов; граничные условия заданы с незначительными упрощениями; свойства материалов выбраны без достаточного обоснования; анализ усталостной долговечности выполнен не в полном объёме (не учтён масштабный фактор или качество поверхности); оптимизация проведена, но не представлено количественное сравнение с исходным вариантом; верификация выполнена только одним методом; в оформлении пояснительной записки имеются отдельные нарушения (незначительные ошибки в оформлении списка литературы, пропущены одна-две ссылки на рисунки). При защите студент демонстрирует уверенное владение материалом, отвечает на вопросы, но допускает незначительные неточности.

### *9.3. Оценка «удовлетворительно»*

Оценка «удовлетворительно» выставляется при выполнении следующих условий.

Задание выполнено в основном, но имеются существенные замечания по содержанию или оформлению. Сроки выполнения отдельных этапов могли быть нарушены без уважительных причин.

К существенным замечаниям относятся: конечно-элементная сетка слишком грубая, анализ сходимости не выполнялся; граничные условия заданы неверно (не соответствуют динамическому расчёту); свойства материалов выбраны ошибочно; результаты прочностного анализа не проанализированы (нет выявления опасных зон); коэффициенты запаса прочности ниже нормативных, но рекомендации по изменению конструкции не даны; усталостный анализ не выполнялся для деталей, работающих в условиях циклического нагружения; оптимизация не проводилась; верификация отсутствует; пояснительная записка оформлена с грубыми нарушениями. При защите студент испытывает затруднения при ответах на вопросы, отвечает неуверенно, требует наводящих вопросов руководителя.

Оценка «удовлетворительно» является минимальной положительной оценкой.

### *9.4. Оценка «неудовлетворительно»*

Оценка «неудовлетворительно» выставляется в следующих случаях.

Задание не выполнено в целом (отсутствует конечно-элементный анализ, нет цветовых карт, нет пояснительной записки). Либо задание выполнено с грубыми нарушениями: импорт моделей не выполнен; сетка отсутствует или имеет недопустимое качество; граничные условия не заданы; результаты расчёта не получены; коэффициенты запаса прочности не определены; оптимизация не проводилась; верификация отсутствует; пояснительная записка отсутствует или имеет объём менее 20 страниц без основных разделов. При защите студент не владеет материалом, не отвечает на вопросы.

Оценка «неудовлетворительно» означает, что курсовой проект не засчитан. Студент обязан устранить все выявленные недостатки и представить работу к повторной защите в установленные кафедрой сроки. Без положительной оценки по курсовому проекту студент не может быть допущен к следующему этапу сквозного проекта (разработка конструкторской документации и технологической подготовки производства).

### *9.5. Порядок апелляции*

Студент имеет право на апелляцию результатов оценки в порядке, установленном локальными нормативными актами университета. Апелляция подаётся на имя заведующего кафедрой не позднее трёх рабочих дней после объявления оценки.

## 10. Список рекомендуемой литературы

### *10.1. Основная литература*

Колчин А.И., Демидов В.П. Расчёт автомобильных и тракторных двигателей: учебное пособие для вузов. — М.: Высшая школа, 2017. — 496 с. Пособие содержит подробную методику теплового, динамического и прочностного расчёта двигателей. Приведены аналитические формулы для расчёта шатуна, поршня, коленчатого вала.

Луканин В.Н., Морозов К.А., Хачиян А.С. Двигатели внутреннего сгорания: учебник для вузов. В 3 кн. Кн. 2. Конструкция и расчёт. — 2-е изд. — М.: Высшая школа, 2015. — 479 с. В учебнике изложены методы прочностного расчёта основных деталей поршневых двигателей.

Басов К.А. ANSYS Workbench для студентов и инженеров. — М.: ДМК Пресс, 2019. — 328 с. Практическое руководство по работе в среде ANSYS Workbench, включая построение сетки, задание граничных условий, анализ результатов.

### *10.2. Дополнительная литература*

Анурьев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя: в 3 т. — М.: Машиностроение, 2017. Содержит сведения о свойствах материалов, концентраторах напряжений, допускаемых напряжениях.

Орлин А.С., Круглов М.Г. Двигатели внутреннего сгорания: конструкция и расчёт. — М.: Машиностроение, 2018. — 512 с.

Методические указания по прочностному расчёту деталей поршневых двигателей (кафедральные разработки).

### *10.3. Периодические издания*

«Двигателестроение». Межотраслевой научно-технический журнал. ISSN: 0202-1633. Публикует статьи по прочностному анализу, оптимизации, усталостной долговечности деталей двигателей.

«Автомобильная промышленность». Научно-технический журнал.

«Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия Машиностроение». Научный журнал, включённый в перечень ВАК.

### *10.4. Электронные ресурсы*

Znanium.com — электронно-библиотечная система (доступ через университетскую подписку).

eLIBRARY.RU — научная электронная библиотека.

ANSYS Learning Resources — официальные учебные материалы и видеоуроки: https://www.ansys.com/training-center.

### *10.5. Нормативно-техническая документация*

ГОСТ 2.105-95 ЕСКД. Общие требования к текстовым документам.

ГОСТ 2.104-2006 ЕСКД. Основные надписи.

ГОСТ 2.301-68* ЕСКД. Форматы.

ГОСТ 2.302-68* ЕСКД. Масштабы.

ГОСТ 2.303-68* ЕСКД. Линии.

ГОСТ 2.304-81 ЕСКД. Шрифты чертежные.

ГОСТ 2.305-2008 ЕСКД. Изображения — виды, разрезы, сечения.

ГОСТ 2.307-2011 ЕСКД. Нанесение размеров и предельных отклонений.

ГОСТ 2.309-73 ЕСКД. Обозначение шероховатости поверхностей.

ГОСТ 2.311-68 ЕСКД. Изображение резьбы.

ГОСТ 2.315-68 ЕСКД. Изображения упрощённые и условные крепёжных деталей.

### *10.6. Рекомендации по работе с литературой*

При выполнении курсового проекта рекомендуется использовать несколько источников для сравнения методов расчёта и справочных данных. Для свойств материалов следует использовать официальные справочники и ГОСТы. Для освоения ANSYS Workbench рекомендуется выполнить встроенные учебные примеры (Tutorials). Все использованные источники должны быть указаны в списке литературы, а ссылки на них приведены в тексте пояснительной записки.

## Приложения

В приложениях к учебному пособию размещаются образцы документов, шаблоны и примеры, которые студент может использовать в качестве ориентира при выполнении курсового проекта. Приложения не входят в основной объём пособия, но являются его неотъемлемой частью. Рекомендуемый объём приложений — от 5 до 15 страниц.

Ниже приведено описание содержания каждого приложения. В реальном пособии после каждого описания должны следовать

соответствующие образцы, шаблоны и примеры, оформленные в соответствии с требованиями.

## *Приложение А. Образец титульного листа пояснительной записки*

Титульный лист является первой страницей пояснительной записки. Он должен содержать полное наименование университета, факультета и кафедры, направление подготовки и профиль, тему курсового проекта, сведения о студенте (фамилия, имя, отчество, номер учебной группы), сведения о руководителе (должность, учёная степень, учёное звание, фамилия и инициалы), город и год выполнения. Также на титульном листе указывается гриф «К защите на этапе 3 сквозного проекта».

Ниже приведён шаблон титульного листа.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования

«МОСКОВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

(МОСКОВСКИЙ ПОЛИТЕХ)

Транспортный факультет

Кафедра «Энергоустановки для транспорта и малой энергетики»

Направление подготовки: 13.03.03 Энергетическое машиностроение

Профиль: «Поршневые двигатели и турбомашины»

КУРСОВОЙ ПРОЕКТ

по дисциплине «Конструирование и расчет поршневых двигателей»

на тему: «Прочностной анализ и оптимизация шатуна рядного четырёхцилиндрового бензинового двигателя»

Студент: Иванов Иван Иванович, группа 241-111

Руководитель: доцент, к.т.н. Петров П.П.

К защите на этапе 3 сквозного проекта

Москва — 2026

## *Приложение Б. Образец индивидуального задания*

Индивидуальное задание выдаётся руководителем и содержит перечень подлежащих разработке вопросов, исходные данные, сроки выполнения и требования к результатам.

ИНДИВИДУАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ № 3

на выполнение курсового проекта по дисциплине «Конструирование и расчет поршневых двигателей»

Студент: Иванов Иван Иванович, группа 241-111

Тема: Прочностной анализ и оптимизация шатуна рядного четырёхцилиндрового бензинового двигателя

Исходные данные:

- 3D-модель шатуна (формат STEP) — из дисциплины Б1.1.12;
- силы, действующие на шатун ($T, K, P_\Sigma$) — из динамического расчёта (Б1.2.4);
- давление газов $p = f(\varphi)$ — из теплового расчёта (Б1.1.20);
- материал шатуна — сталь 40Х (E = 2,0e5 МПа, ν = 0,3, $\sigma_т$ = 785 МПа, $\sigma_в$ = 980 МПа);
- расчётный режим — максимальный крутящий момент ($\varphi = 370°$).

Перечень подлежащих разработке вопросов:

- выполнить импорт и упрощение 3D-модели шатуна;
- построить конечно-элементную сетку с анализом сходимости;
- задать граничные условия и нагрузки;
- выполнить прочностной анализ (поля напряжений, деформаций, коэффициент запаса);
- выполнить анализ усталостной долговечности;
- провести параметрическую оптимизацию (сечение стержня, радиусы галтелей);
- выполнить верификацию результатов (сравнение с аналитическим расчётом);
- оформить эскизный рабочий чертёж шатуна.

Срок сдачи проекта: 15 мая 2026 г.

Руководитель: Петров П.П.

Задание принял: Иванов И.И.
Утверждаю: заведующий кафедрой Сидоров С.С.

## *Приложение В. Образец календарного плана*

Таблица В.1
Календарный план выполнения курсового проекта студента Иванова И.И., группа 241-111

| № | Наименование этапа | Срок начала | Срок окончания | Отметка |
|---|---|---|---|---|
| 1 | Получение задания, сбор исходных данных | 01.02.2026 | 14.02.2026 | |
| 2 | Импорт и упрощение геометрии шатуна | 15.02.2026 | 28.02.2026 | |
| 3 | Построение сетки, анализ сходимости | 01.03.2026 | 14.03.2026 | |
| 4 | Задание граничных условий и нагрузок | 15.03.2026 | 21.03.2026 | |
| 5 | Прочностной анализ | 22.03.2026 | 04.04.2026 | |
| 6 | Усталостный анализ | 05.04.2026 | 11.04.2026 | |
| 7 | Параметрическая оптимизация | 12.04.2026 | 25.04.2026 | |

| № | Наименование этапа | Срок начала | Срок окончания | Отметка |
|---|---|---|---|---|
| 8 | Верификация результатов | 26.04.2026 | 02.05.2026 | |
| 9 | Оформление эскизного чертежа | 03.05.2026 | 09.05.2026 | |
| 10 | Оформление пояснительной записки | 10.05.2026 | 16.05.2026 | |
| 11 | Сдача работы, защита | 17.05.2026 | 05.06.2026 | |

## *Приложение Г. Образец рабочего дневника студента*

Таблица Г.1
Рабочий дневник студента Иванова И.И., группа 241-111

| Дата | Вид выполненной работы | Часы | Трудности | Рекомендации | Отметка |
|---|---|---|---|---|---|
| 05.02 | Импорт модели шатуна в ANSYS | 2 | Нет | — | + |
| 10.02 | Консультация с руководителем | 1 | — | Упростить масляный канал | + |

| Дата | Вид выполненной работы | Часы | Трудности | Рекомендации | Отметка |
|---|---|---|---|---|---|
| 15.02 | Упрощение геометрии | 3 | Сложности с удалением фасок | Использовать SpaceClaim | + |
| 20.02 | Построение сетки | 4 | Нет | — | + |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... |

***Приложение Д. Пример оформления цветовой карты напряжений***

В данном приложении приводится пример цветовой карты эквивалентных напряжений по Мизесу для шатуна. На карте должны быть указаны: шкала напряжений (от синего — минимум до красного — максимум), зоны максимальных напряжений, масштаб. Пример подписи: «Рисунок Д.1 — Поле эквивалентных напряжений в шатуне ($\sigma_{экв}$, МПа)».

***Приложение Е. Пример аналитического расчёта для верификации***

В данном приложении приводится пример аналитического расчёта шатуна для верификации результатов конечно-элементного анализа.

**Пример. Расчёт шатуна на сжатие.** Исходные данные: сила $P_{\Sigma} = 25$ кН, площадь сечения стержня шатуна $F = 180$ мм². Напряжение сжатия $\sigma_{сж} = P_{\Sigma} / F = 25000 / 180 = 139$ МПа. Расчётное напряжение по FEA: $\sigma_{экв}$ = 145 МПа. Расхождение:

$(145 - 139) / 139 \times 100\% = 4{,}3\%$ — в пределах допустимого (15%).

## *Приложение Ж. Перечень вопросов для защиты курсового проекта*

1. Какова цель прочностного расчёта шатуна (поршня, коленчатого вала) и как он связан с третьим этапом сквозного проекта?
2. Какие исходные данные использовались для прочностного анализа? Откуда они получены?
3. Как выполнялось упрощение геометрии для CAE-анализа?
4. Как строилась конечно-элементная сетка? Что такое анализ сходимости?
5. Какие граничные условия и нагрузки были заданы? Почему?
6. Что показывают поля эквивалентных напряжений по Мизесу?
7. Каковы полученные коэффициенты запаса прочности? Соответствуют ли они нормативным?
8. Как выполнялся анализ усталостной долговечности? Какие факторы учитывались?
9. Какая оптимизация была проведена? Насколько удалось снизить массу?
10. Как выполнялась верификация результатов? Каково расхождение с аналитическим расчётом?
11. Какие изменения в 3D-модель необходимо внести по результатам расчёта?
12. Как результаты данного проекта будут использованы на следующих этапах сквозного проекта?

## *Приложение З. Образец презентации (миниатюры слайдов)*

Структура презентации (10–14 слайдов):

1. Титульный слайд

2. Цель и задачи проекта
3. Расчётная модель (3D-модель шатуна, упрощение геометрии)
4. Свойства материалов и граничные условия
5. Конечно-элементная сетка (с анализом сходимости)
6. Поле эквивалентных напряжений (цветовая карта)
7. Поле деформаций и коэффициент запаса прочности
8. Усталостный анализ (коэффициенты запаса по усталости)
9. Параметрическая оптимизация (сравнение вариантов)
10. Верификация (сравнение с аналитическим расчётом)
11. Эскизный рабочий чертёж шатуна
12. Выводы и связь со сквозным проектом
13. Благодарность за внимание

# Заключение

Настоящее учебное пособие предназначено для оказания методической помощи студентам при выполнении курсового проекта по дисциплине «Конструирование и расчет поршневых двигателей». В пособии последовательно изложены все этапы работы: от импорта 3D-моделей и построения конечно-элементной сетки до прочностного анализа, усталостной долговечности, оптимизации, верификации и оформления эскизных чертежей.

Особое внимание уделено месту данного курсового проекта в структуре сквозного проектирования. Результаты прочностного анализа — поля напряжений, коэффициенты запаса прочности, оптимизированная геометрия — являются основой для корректировки 3D-моделей и последующей разработки конструкторской документации (этап 4). Верифицированные детали, прошедшие проверку на прочность и усталостную долговечность, становятся готовыми к производству.

Успех в выполнении курсового проекта зависит от трёх составляющих: внимательного освоения CAE-системы, корректного задания граничных условий и нагрузок, а также тщательного анализа полученных результатов. Не откладывайте работу на последние недели семестра — конечно-элементный анализ требует времени на построение сетки, расчёт и интерпретацию результатов. Ошибки, обнаруженные на поздних этапах, исправлять значительно труднее.

Регулярно консультируйтесь с руководителем, показывайте промежуточные результаты (сетку, первые цветовые карты, результаты оптимизации), не стесняйтесь задавать вопросы. Руководитель заинтересован в вашем успехе и готов помочь разобраться в сложных вопросах конечно-элементного анализа, выборе граничных условий и интерпретации результатов.

Желаем вам успешного выполнения курсового проекта, глубокого понимания методов прочностного анализа и уверенного применения полученных знаний на последующих этапах сквозного проекта. Пусть спроектированные вами детали будут прочными, надёжными и оптимизированными, а разработанная на

их основе конструкторская документация станет основой для реального производства.

# Библиографический список

1. Машиностроение. Энциклопедия. Ред совет: К.В. Фролов (пред.) и др. — М.: Машиностроение. Двигатели внутреннего сгорания. Т. IV-14 / Л.В. Грехов, Н.А. Иващенко, В.А. Марков и др.; Под общ. ред. А.А. Александрова и Н.А. Иващенко. 2013. 784 с.: ил.

2. Тракторы. Конструкция: учебник для студентов вузов. 3-е изд., перераб. и доп. /|В.М. Шарипов|, А.В. Акимов, Д.В. Апелинский и др.; под общ. ред. В.М. Шарипова. — М.: Инновационное машиностроение, 2019. —804 с.: ил.

3. Кавтарадзе Р.З. Теория поршневых двигателей. Специальные главы: Учебник для вузов. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. — 720 с.: ил.

4. Колчин А.И., Демидов В.П. Расчет автомобильных и тракторных двигателей: Учеб, пособие для вузов,- 3-е изд., перераб. и доп,- М., 2003.

5. Олисевич О.В. Разработка математических моделей и расчетно-экспериментальное исследование дизельных аккумуляторных топливных систем с электрогидравлическими форсунками. Диссер. на соиск. учен. степ. кандид. техн. наук. – М. 2008, 161 стр.

6. Покровский Г.П. Электроника в системе подачи топлива автомобильных двигателей / Г.П. Покровский. – М.: Машиностроение, 1990. – 176 стр., ил.

7. Системы управления дизельными двигателями. Перевод с немецкого. Первое русское издание. — М.: ЗАО «КЖИ «За рулем», 2004. — 480 с.: ил.

8. Системы управления бензиновыми двигателями. Перевод с немецкого. Первое русское издание. — М.: ООО «Книжное издательство «За рулем», 2005. — 432 с.: ил.

9. Райков И. Я., Макаров А. Р., Сергиевский А. В. Конструкция автомобиля: учебник для вузов: в 4 т. / Райков И. Я., Макаров А. Р., Сергиевский А. В. [и др.]; ред. Райков И. Я.; общ. ред. Карунин А. Л. – М. : Изд-во МГТУ "МАМИ", 2001. Т. 2 : Двигатель. - 2001. - 567 с. : ил.

10. Грехов Л.В., Иващенко Н.А., Марков В.А. Топливная аппаратура системы управления дизелей: учебник для вузов.- М., 2004.