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.

Динамический расчет поршневых двигателей

Методические указания

по подготовке курсового проекта для студентов, обучающихся по направлению подготовки бакалавров 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

Рецензенты:
Гринев Вадим Николаевич, Начальник отдела альтернативных энергоустановок ФГУП «НАМИ», кандидат технических наук

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

Динамический расчет поршневых двигателей: Методические указания. – М.: Московский политехнический университет, 2026.– 54 с.

Методические указания содержат пошаговую методику кинематического и динамического расчёта кривошипно-шатунного механизма поршневого двигателя. В пособии изложены методы определения сил, действующих в двигателе, построения полярных диаграмм нагрузок на шатунные шейки, диаграмм износа, расчёта суммарного крутящего момента и анализа уравновешенности двигателя. 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 8
Структура пособия 9
Раздел 1. Цели и задачи курсового проекта 10
1.1. Цель выполнения курсового проекта 10
1.2. Задачи курсового проекта 10
1.3. Формируемые компетенции и индикаторы их достижения 12
1.4. Результат выполнения курсового проекта 12
Раздел 2. Требования к содержанию и структуре работы . 13
2.1. Примерный перечень тем курсовых проектов 13
2.2. Структура пояснительной записки 14
2.3. Состав графической части 16
2.4. Требования к оформлению расчётной части 17
Раздел 3. Исходные данные и их получение 18
3.1. Источники исходных данных 18
3.2. Связь с предшествующими дисциплинами 19
3.3. Порядок получения индивидуального задания и согласования темы 20
3.4. Сроки выполнения этапов 21
Раздел 4. Методические указания по выполнению курсового проекта 21
4.1. Подготовительный этап 21
4.2. Кинематический расчёт кривошипно-шатунного механизма 22
4.3. Приведение масс деталей кривошипно-шатунного механизма 23

4.4. Расчёт сил, действующих в кривошипно-шатунном механизме 24
4.5. Построение полярной диаграммы сил, действующих на шатунную шейку 25
4.6. Расчёт суммарного крутящего момента и маховика 25
4.7. Анализ уравновешенности двигателя 26
4.8. Типичные ошибки и способы их предотвращения 26
Раздел 5. Требования к оформлению пояснительной записки 27
5.1. Общие требования к оформлению 27
5.2. Оформление текста 28
5.3. Оформление иллюстраций (рисунков) 29
5.4. Оформление таблиц 30
5.5. Оформление формул 30
5.6. Оформление ссылок и списка литературы 31
5.7. Оформление приложений 32
Раздел 6. Требования к оформлению графической части . 32
6.1. Состав графической части 32
6.2. Требования к выполнению графиков 32
6.3. Требования к выполнению полярной диаграммы 33
6.4. Требования к презентации (при наличии) 33
Раздел 7. Программное обеспечение и инструменты 34
7.1. Основное программное обеспечение 34
7.2. Вспомогательное программное обеспечение 35
7.3. Учебные ресурсы по программному обеспечению 35
7.4. Требования к форматам сдаваемых файлов 35
7.5. Структура электронного архива 36
Раздел 8. Организация выполнения и защиты курсового проекта 36
8.1. Календарный план выполнения курсового проекта 36
8.2. Взаимодействие с руководителем 37
8.3. Порядок сдачи курсового проекта 37

8.4. Защита курсового проекта 37
8.5. Критерии оценки 37
Раздел 9. Критерии оценки курсового проекта 38
9.1. Оценка «отлично» 38
9.2. Оценка «хорошо» 39
9.3. Оценка «удовлетворительно» 40
9.4. Оценка «неудовлетворительно» 40
Раздел 10. Список рекомендуемой литературы 41
10.1. Основная литература 41
10.2. Дополнительная литература 41
10.3. Периодические издания 42
10.4. Электронные ресурсы 42
10.5. Нормативно-техническая документация 42
Приложения 43
Приложение А. Образец титульного листа пояснительной записки 43
Приложение Б. Образец индивидуального задания 44
Приложение В. Образец календарного плана 45
Приложение Г. Образец рабочего дневника студента 47
Приложение Д. Пример оформления графиков и диаграмм 48
Приложение Е. Пример таблицы динамического расчёта ... 48
Приложение Ж. Перечень вопросов для защиты курсового проекта 49
Приложение З. Образец презентации (миниатюры слайдов) 50
Заключение 51
Библиографический список 53

Введение

Дисциплина Б1.2.4 «Динамический расчет поршневых двигателей» занимает ключевое место в структуре подготовки бакалавров по направлению 13.03.03 «Энергетическое машиностроение» (профиль «Поршневые двигатели и турбомашины»). Она изучается в пятом семестре и относится к части блока Б1, формируемой участниками образовательных отношений. Если дисциплина «Теория рабочих процессов поршневых двигателей» дала студенту понимание термодинамических процессов, происходящих в цилиндре, то «Динамический расчет» раскрывает, какие механические силы возникают в двигателе в результате этих процессов, и как эти силы нагружают детали кривошипно-шатунного механизма.

Место дисциплины в образовательной программе

Дисциплина опирается на фундаментальные знания, полученные студентами при изучении таких дисциплин, как «Физика» (разделы механики), «Теоретическая механика» (кинематика и динамика механических систем), «Сопротивление материалов» (основы прочности), «Инженерная механика машин и механизмов» (структурный и кинематический анализ механизмов), а также «Теория рабочих процессов поршневых двигателей» (давление газов в цилиндре как функция угла поворота коленчатого вала). Важно отметить, что расчёт выполняется для двигателя, 3D-модель которого была создана на втором этапе сквозного проекта (дисциплина Б1.1.12 «Автоматизированное проектирование в двигателестроении»), а исходные данные о давлении газов получены при выполнении курсовой работы по дисциплине Б1.1.20 «Теория рабочих процессов поршневых двигателей». Это обеспечивает преемственность и позволяет студенту работать над единым объектом проектирования.

В свою очередь, результаты освоения дисциплины «Динамический расчет» являются фундаментом для последующего изучения дисциплины «Конструирование и расчет

поршневых двигателей» (Б1.2.8). Результаты динамического расчёта (силы, действующие в кривошипно-шатунном механизме, нагрузки на шатунные и коренные шейки коленчатого вала) используются при выполнении курсового проекта по конструированию и расчёту для задания граничных условий при прочностном анализе деталей методом конечных элементов. Таким образом, динамический расчёт является связующим звеном между термодинамикой и прочностью.

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 «Динамический расчет поршневых двигателей» является составной частью отчёта по **третьему этапу сквозного проекта — «CAE. Расчёты» (5 семестр)**. Результатом выполнения данного курсового проекта становится **кинематический и динамический расчёт кривошипно-шатунного механизма**, который включает следующие ключевые артефакты:

- кинематические характеристики: перемещение, скорость и ускорение поршня в зависимости от угла поворота коленчатого вала;
- силы инерции возвратно-поступательно движущихся масс (первого и второго порядка);
- силы инерции вращающихся масс (центробежные силы);
- суммарные силы, действующие на поршневой палец;
- силы, действующие на шатунную шейку коленчатого вала (тангенциальная и радиальная составляющие);
- полярные диаграммы нагрузок на шатунную и коренную шейки;
- диаграммы износа шеек для выбора расположения маслоподводящих каналов;

- суммарный крутящий момент двигателя;
- анализ уравновешенности двигателя.

В ходе выполнения проекта студент определяет силы, действующие в двигателе, нагрузки на шейки коленчатого вала, анализирует уравновешенность двигателя. Результаты динамического расчёта (величины и законы изменения сил, действующих на шатунную шейку) являются основой для задания граничных условий при прочностном расчёте деталей кривошипно-шатунного механизма в курсовом проекте по дисциплине «Конструирование и расчет поршневых двигателей» (Б1.2.8). Без правильно выполненного динамического расчёта невозможно корректно определить напряжения и деформации в деталях, что делает этот этап критически важным для обеспечения прочности и надёжности проектируемого двигателя.

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 частности, формируется индикатор 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 «Динамический расчет поршневых двигателей» в контексте третьего этапа сквозного проектирования.

Задачи пособия:

- разъяснить место и роль курсового проекта в структуре сквозного проектирования;

- дать рекомендации по выбору исходных данных и организации расчёта;
- изложить требования к содержанию и структуре пояснительной записки и графической части;
- предоставить пошаговые методические указания по выполнению кинематического и динамического расчёта;
- описать методику построения полярных диаграмм и диаграмм износа шеек;
- привести требования к оформлению пояснительной записки и графической части;
- 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 кинематического и динамического расчёта). 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 для выполнения расчёта.

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.

Раздел 1. Цели и задачи курсового проекта

1.1. Цель выполнения курсового проекта

Целью курсового проекта по дисциплине «Динамический расчет поршневых двигателей» является выполнение кинематического и динамического расчёта кривошипно-шатунного механизма проектируемого поршневого двигателя, определение суммарных сил, действующих в двигателе, нагрузок на шейки коленчатого вала, а также анализ уравновешенности двигателя для последующего использования полученных результатов в прочностном расчёте деталей.

Результаты динамического расчёта служат основой для задания граничных условий при прочностном анализе деталей кривошипно-шатунного механизма и являются необходимым звеном между тепловым расчётом (определение давления газов) и прочностным расчётом (определение напряжений и деформаций).

1.2. Задачи курсового проекта

Для достижения поставленной цели студент должен решить следующие задачи.

Первая задача — выполнить кинематический расчёт кривошипно-шатунного механизма. Определить перемещение, скорость и ускорение поршня в зависимости от угла поворота коленчатого вала. Построить графики кинематических характеристик. Проанализировать влияние кинематического параметра $\lambda = R/L$ на характер движения поршня.

Вторая задача — выполнить приведение масс деталей кривошипно-шатунного механизма к динамически эквивалентной системе. Определить массы, совершающие возвратно-поступательное движение (поршень, поршневые кольца, палец, верхняя часть шатуна). Определить массы, совершающие вращательное движение (неуравновешенные части шатуна, щеки и противовесы коленчатого вала).

Третья задача — определить силы, действующие в кривошипно-шатунном механизме. Рассчитать силы давления

газов с использованием индикаторной диаграммы, полученной в курсовой работе по дисциплине «Теория рабочих процессов поршневых двигателей». Рассчитать силы инерции возвратно-поступательно движущихся масс (силы инерции первого и второго порядка). Рассчитать центробежные силы инерции вращающихся масс. Определить суммарную силу, действующую на поршневой палец. Разложить суммарную силу на нормальную силу (перпендикулярную оси цилиндра) и силу, действующую вдоль шатуна. Разложить силу, действующую вдоль шатуна, на тангенциальную и радиальную составляющие.

Четвёртая задача — определить силы, действующие на шатунные и коренные шейки коленчатого вала. Построить таблицу динамического расчёта. Определить результирующую силу, действующую на шатунную шейку, с учётом центробежной силы вращающихся масс шатуна. Построить полярную диаграмму сил, действующих на шатунную шейку. Построить диаграмму износа шатунной шейки для определения оптимального расположения маслоподводящих каналов.

Пятая задача — определить суммарный крутящий момент двигателя. Рассчитать крутящий момент одного цилиндра от сил давления газов и сил инерции. Построить график суммарного крутящего момента многоцилиндрового двигателя методом табличного суммирования. Определить средний крутящий момент и коэффициент неравномерности. Выполнить расчёт маховика для обеспечения заданной степени неравномерности хода двигателя.

Шестая задача — выполнить анализ уравновешенности двигателя. Проверить выполнение условий полного уравновешивания (равенство нулю главного вектора и главного момента сил инерции). Оценить внешнюю и внутреннюю неуравновешенность двигателя. Предложить способы уравновешивания (противовесы на коленчатом валу, балансирные валы) с учётом конструктивной схемы двигателя.

Седьмая задача — подготовить исходные данные для последующего прочностного расчёта. Сформировать таблицы и графики сил, действующих на шатунную шейку коленчатого вала, для использования в качестве граничных условий в CAE-системе при выполнении курсового проекта по дисциплине «Конструирование и расчет поршневых двигателей».

1.3. Формируемые компетенции и индикаторы их достижения

В результате выполнения курсового проекта у студента формируется следующая профессиональная компетенция.

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

Данная компетенция формируется в процессе выполнения динамического расчёта и подготовки данных для последующего прочностного анализа. Индикатор достижения:

- ИПК-2.7: студент способен выполнять верифицированный прочностной расчёт ответственной детали кривошипно-шатунного механизма в CAE-среде на основе ранее рассчитанных динамических нагрузок. В рамках курсового проекта студент определяет величины и законы изменения сил, действующих на шатунную шейку, что является основой для задания граничных условий при прочностном расчёте.

1.4. Результат выполнения курсового проекта

По завершении курсового проекта студент представляет следующий комплект материалов.

Пояснительная записка объёмом 25–35 страниц, оформленная в соответствии с требованиями ЕСКД и локальными нормативными актами университета. Пояснительная записка включает: титульный лист, индивидуальное задание, реферат, содержание, введение, кинематический расчёт, динамический расчёт, анализ уравновешенности, заключение, список литературы и приложения.

Графическая часть включает следующие материалы, оформленные на листах формата А3 или А4 (в зависимости от требований руководителя):

- графики кинематических характеристик (перемещение, скорость, ускорение поршня в функции угла поворота коленчатого вала);
- развёрнутая индикаторная диаграмма в координатах p–φ;

- графики тангенциальной и радиальной сил для одного цилиндра;
- полярная диаграмма сил, действующих на шатунную шейку;
- диаграмма износа шатунной шейки;
- график суммарного крутящего момента двигателя.

Электронный архив содержит файл пояснительной записки в форматах .docx и .pdf, файлы с графическими материалами в форматах .pdf или .jpg, а также файл с расчётами в формате Microsoft Excel (при выполнении расчёта в электронных таблицах).

Все эти материалы являются составной частью отчёта по третьему этапу сквозного проекта «CAE. Расчёты» и служат исходными данными для выполнения курсового проекта по дисциплине «Конструирование и расчет поршневых двигателей» (Б1.2.8).

Раздел 2. Требования к содержанию и структуре работы

2.1. Примерный перечень тем курсовых проектов

Тематика курсовых проектов по дисциплине «Динамический расчет поршневых двигателей» формируется в зависимости от типа двигателя, его назначения, числа и расположения цилиндров. Студент выполняет расчёт для двигателя, 3D-модель которого была создана на втором этапе сквозного проекта, а тепловой расчёт выполнен на третьем этапе. Это обеспечивает преемственность и позволяет студенту работать над единым объектом проектирования.

Ниже приведён примерный перечень тем, сгруппированных по типам двигателей.

По рядным двигателям:

- Динамический расчёт рядного четырёхцилиндрового бензинового двигателя для легкового автомобиля.
- Динамический расчёт рядного шестицилиндрового дизельного двигателя для грузового автомобиля.

- Динамический расчёт рядного трёхцилиндрового двигателя для малолитражного автомобиля.
- Динамический расчёт рядного двухцилиндрового двигателя для мотоцикла.

По V-образным двигателям:

- Динамический расчёт V-образного шестицилиндрового бензинового двигателя.
- Динамический расчёт V-образного восьмицилиндрового дизельного двигателя.
- Динамический расчёт V-образного четырёхцилиндрового двигателя (с углом развала 90°).

По двигателям с дезаксиальным КШМ:

- Динамический расчёт двигателя с дезаксиальным кривошипно-шатунным механизмом (смещение оси цилиндра).

По двигателям с прицепным шатуном:

- Динамический расчёт V-образного двигателя с прицепным шатуном.

Выбранная тема должна соответствовать исходным данным, полученным из теплового расчёта (давление газов, диаметр цилиндра, ход поршня, частота вращения). Результаты динамического расчёта (силы, действующие на шатунную шейку) используются при выполнении прочностного расчёта деталей кривошипно-шатунного механизма.

2.2. Структура пояснительной записки

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

Титульный лист является первой страницей пояснительной записки. Он оформляется в соответствии с установленным образцом и содержит наименование университета, факультета, кафедры, направление подготовки, профиль, тему курсового проекта, сведения о студенте и руководителе, город и год выполнения. На титульном листе также указывается гриф «К защите на этапе 3 сквозного проекта».

Индивидуальное задание выдаётся руководителем и содержит перечень подлежащих разработке вопросов, исходные данные (тип двигателя, число цилиндров, диаметр цилиндра, ход

поршня, степень сжатия, частоту вращения, давление газов из теплового расчёта), сроки выполнения и требования к результатам. Задание подписывается студентом и руководителем.

Реферат представляет собой краткую характеристику работы объёмом 500–800 знаков. В реферате указываются: объём пояснительной записки, количество рисунков, таблиц, источников; перечень ключевых слов; объект расчёта (тип двигателя, число цилиндров); цель работы; краткое содержание работы по разделам; основные результаты (кинематические характеристики, силы, нагрузки на шейки, уравновешенность).

Содержание включает наименования всех разделов, подразделов и приложений с указанием номеров страниц.

Введение (объёмом 1–2 страницы) содержит обоснование актуальности темы, описание объекта расчёта, формулировку цели и задач курсового проекта, а также краткую характеристику структуры работы.

Глава 1. Кинематический расчёт кривошипно-шатунного механизма (объёмом 5–7 страниц) включает: определение кинематического параметра $\lambda = R/L$; расчёт перемещения, скорости и ускорения поршня (точные и приближённые формулы); построение графиков кинематических характеристик в функции угла поворота коленчатого вала; анализ влияния параметра λ на характер движения поршня.

Глава 2. Динамический расчёт кривошипно-шатунного механизма (объёмом 10–12 страниц) включает: приведение масс деталей КШМ; расчёт сил давления газов (с использованием развёрнутой индикаторной диаграммы); расчёт сил инерции возвратно-поступательно движущихся масс (первого и второго порядка); расчёт центробежных сил инерции вращающихся масс; определение суммарной силы, действующей на поршневой палец; разложение суммарной силы на нормальную силу и силу, действующую вдоль шатуна; разложение силы вдоль шатуна на тангенциальную и радиальную составляющие; построение графиков тангенциальной и радиальной сил в функции угла поворота коленчатого вала.

Глава 3. Расчёт нагрузок на шатунные и коренные шейки (объёмом 5–7 страниц) включает: определение сил, действующих на шатунную шейку с учётом центробежной силы вращающихся

масс шатуна; построение полярной диаграммы сил, действующих на шатунную шейку; построение диаграммы износа шатунной шейки; определение оптимального расположения маслоподводящих каналов.

Глава 4. Суммарный крутящий момент и уравновешивание двигателя (объёмом 5–7 страниц) включает: расчёт крутящего момента одного цилиндра; построение суммарного крутящего момента многоцилиндрового двигателя; определение среднего крутящего момента и коэффициента неравномерности; расчёт маховика; анализ уравновешенности двигателя (силы инерции первого и второго порядка, центробежные силы, моменты сил); предложение способов уравновешивания.

Заключение (объёмом 1–2 страницы) содержит краткие выводы по результатам выполнения курсового проекта: основные динамические характеристики, максимальные и минимальные значения сил, анализ уравновешенности, а также указание на то, как результаты данной работы будут использованы на последующем этапе сквозного проекта (для прочностного расчёта деталей).

Список использованных источников включает все источники, на которые имеются ссылки в тексте (не менее 10–15 наименований).

Приложения содержат вспомогательные материалы: таблицу динамического расчёта (сводная таблица сил для всех углов поворота коленчатого вала), распечатки расчётов в Excel, дополнительные графики.

2.3. Состав графической части

Графическая часть курсового проекта включает следующие материалы, которые могут быть представлены на отдельных листах формата А3 или А4 либо включены в пояснительную записку в качестве иллюстраций.

Графики кинематических характеристик (1 лист): перемещение поршня $S = f(\varphi)$, скорость поршня $V = f(\varphi)$, ускорение поршня $j = f(\varphi)$. Графики строятся для одного оборота коленчатого вала (0–360°) для четырёхтактного

двигателя. Рекомендуемый масштаб: по оси φ — 10 мм = 30°, по оси S — 1 мм = 1 мм, по оси V — 1 мм = 1 м/с, по оси j — 1 мм = 500 м/с².

Развёрнутая индикаторная диаграмма (1 лист) в координатах p–φ, построенная на основе теплового расчёта.

Графики тангенциальной и радиальной сил (1 лист): $T = f(\varphi)$ и $K = f(\varphi)$ для одного цилиндра. Графики строятся для одного оборота коленчатого вала (0–720° для четырёхтактного двигателя).

Полярная диаграмма сил, действующих на шатунную шейку (1 лист). Диаграмма строится в координатах, вращающихся вместе с шейкой. Масштаб выбирается так, чтобы диаграмма занимала не менее половины листа. На диаграмме отмечаются зоны минимального износа для выбора расположения масляного отверстия.

Диаграмма износа шатунной шейки (1 лист). Строится на основе полярной диаграммы методом суммирования векторов сил.

График суммарного крутящего момента двигателя (1 лист): $M_{\text{сум}} = f(\varphi)$. График строится для одного оборота коленчатого вала (0–720°). На графике отмечается средний крутящий момент $M_{\text{ср}}$.

2.4. Требования к оформлению расчётной части

Расчётная часть курсового проекта выполняется с использованием электронных таблиц (Microsoft Excel) или математических пакетов (Mathcad). Расчёт рекомендуется выполнять с шагом угла поворота коленчатого вала 10° или 15° (всего 36 или 24 точки на один оборот). Для каждого угла определяются: давление газов, силы инерции, суммарная сила, тангенциальная и радиальная составляющие.

Результаты расчёта сводятся в таблицу динамического расчёта, которая включает следующие колонки: угол поворота коленчатого вала φ (град); давление газов p (МПа); сила давления газов $P_{\text{г}}$ (кН); сила инерции возвратно-поступательно движущихся масс P_j (кН); суммарная сила P_Σ (кН); нормальная сила N (кН); сила, действующая вдоль шатуна $S_{\text{ш}}$ (кН); тангенциальная сила T

(кН); радиальная сила K (кН); крутящий момент одного цилиндра $M_{\text{кр}}$ (Н·м).

Таблица динамического расчёта выносится в приложение (формат А3 или А4 в альбомной ориентации). Все графики должны быть построены с использованием полученных табличных данных.

Раздел 3. Исходные данные и их получение

3.1. Источники исходных данных

Для успешного выполнения курсового проекта по дисциплине «Динамический расчет поршневых двигателей» студенту необходимо получить и проанализировать исходные данные, которые могут поступать из нескольких источников.

Первым и вторым источником являются результаты предыдущих этапов сквозного проекта. Из курсовой работы по дисциплине «Теория рабочих процессов поршневых двигателей» (Б1.1.20) используются: развёрнутая индикаторная диаграмма давления газов в цилиндре как функция угла поворота коленчатого вала $p = f(\varphi)$; номинальная частота вращения коленчатого вала n_N (мин$^{-1}$); диаметр цилиндра D (мм); ход поршня S (мм); степень сжатия ε. Из курсового проекта по дисциплине «Автоматизированное проектирование в двигателестроении» (Б1.1.12) используются: 3D-модели деталей кривошипно-шатунного механизма (поршень, шатун, коленчатый вал) для определения масс деталей. Из курсового проекта по дисциплине «Графическое проектирование деталей и механизмов энергетических машин» (Б1.1.9) используется эскизная компоновка для определения геометрических соотношений.

Вторым источником являются дисциплины, изучаемые на предыдущих курсах. Дисциплина «Теоретическая механика» даёт знания о кинематике и динамике механических систем, необходимые для вывода формул перемещения, скорости, ускорения поршня. Дисциплина «Сопротивление материалов» используется при определении масс деталей и расчёте

приведённых масс. Дисциплина «Инженерная механика машин и механизмов» даёт понимание кинематического анализа механизмов. Дисциплина «Конструкция поршневых двигателей» (Б1.2.2) даёт знания о конструктивных особенностях кривошипно-шатунного механизма, типовых массах деталей.

Третьим источником является учебная и справочная литература. Студент должен изучить учебники по динамике двигателей внутреннего сгорания, справочники по конструкционным материалам (для определения плотности и масс деталей), таблицы кинематических и динамических соотношений. Рекомендуемые источники приведены в разделе 6 настоящего пособия.

Четвёртым источником являются нормативно-технические документы. Для определения масс деталей могут использоваться отраслевые нормали и стандарты на типовые конструкции.

Пятым источником (при наличии) могут быть данные с предприятия-партнёра. Для студентов, проходящих практику на предприятиях-партнёрах, исходными данными могут служить реальные динамические характеристики выпускаемых двигателей, таблицы масс деталей, результаты испытаний.

3.2. Связь с предшествующими дисциплинами

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

Б1.1.20 «Теория рабочих процессов поршневых двигателей» — развёрнутая индикаторная диаграмма $p = f(\varphi)$, диаметр цилиндра D, ход поршня S, частота вращения n. Без этих данных динамический расчёт невозможен.

Б1.1.12 «Автоматизированное проектирование в двигателестроении» — 3D-модели деталей для определения масс (поршень, шатун, коленчатый вал). Массы деталей могут быть определены через плотность материала и объём модели.

Б1.2.2 «Конструкция поршневых двигателей» — конструктивные схемы КШМ (центральный, дезаксиальный, V-образный), типовые соотношения размеров (длина шатуна L, радиус кривошипа R), массы типовых деталей.

Б1.1.17 «Термодинамика» — понимание рабочих процессов, необходимое для интерпретации индикаторной диаграммы.

Б1.1.26.2 «Математический анализ» — навыки работы с тригонометрическими функциями, разложение в ряды Фурье (для анализа гармоник сил инерции).

Б1.1.15 «Сопротивление материалов» — понимание напряжённо-деформированного состояния, необходимое для интерпретации результатов расчёта нагрузок на шейки.

3.3. Порядок получения индивидуального задания и согласования темы

Процедура получения задания и согласования темы курсового проекта включает несколько этапов.

Первый этап — получение исходных данных из предыдущих этапов. В начале пятого семестра студент должен иметь завершённые результаты курсовой работы по теории рабочих процессов (развёрнутая индикаторная диаграмма, D, S, n) и 3D-модели деталей. Эти материалы предоставляются руководителю для проверки и используются как основа для динамического расчёта.

Второй этап — определение недостающих параметров. На основе типа двигателя и его назначения студент самостоятельно (с консультацией руководителя) определяет: число цилиндров i и их расположение (рядное, V-образное); порядок работы цилиндров; кинематический параметр $\lambda = R/L$ (рекомендуемые значения: для бензиновых двигателей λ = 0,24…0,32; для дизелей λ = 0,22…0,28); массы деталей (поршня, шатуна, коленчатого вала) — могут быть определены по 3D-модели или по справочным данным.

Третий этап — согласование исходных данных с руководителем. Все исходные данные должны быть согласованы с руководителем. При необходимости руководитель корректирует параметры, исходя из опыта и требований к курсовому проекту.

Четвёртый этап — утверждение задания. Индивидуальное задание подписывается студентом и руководителем, после чего утверждается заведующим кафедрой. Задание является основанием для выполнения расчёта.

3.4. Сроки выполнения этапов

Выполнение курсового проекта рассчитано на пятый семестр. Рекомендуемый календарный план представлен ниже.

1–2 недели. Получение индивидуального задания, сбор исходных данных из предыдущих этапов, подбор литературы.

3–4 недели. Кинематический расчёт КШМ: определение перемещения, скорости, ускорения поршня. Построение графиков.

5–8 недели. Динамический расчёт: приведение масс, расчёт сил давления газов, сил инерции, суммарных сил, тангенциальной и радиальной составляющих. Заполнение таблицы динамического расчёта.

9–10 недели. Расчёт нагрузок на шатунную и коренную шейки. Построение полярной диаграммы и диаграммы износа.

11–12 недели. Расчёт суммарного крутящего момента и маховика. Анализ уравновешенности двигателя.

13–15 недели. Оформление пояснительной записки, подготовка графических материалов.

16–18 недели. Сдача работы на проверку, прохождение нормоконтроля, защита курсового проекта.

Соблюдение календарного плана является обязательным требованием. При нарушении сроков без уважительной причины руководитель вправе снизить оценку.

Раздел 4. Методические указания по выполнению курсового проекта

Данный раздел является основным в пособии. Он содержит пошаговое описание выполнения кинематического и динамического расчёта кривошипно-шатунного механизма поршневого двигателя.

4.1. Подготовительный этап

Подготовительный этап является фундаментом всей дальнейшей работы.

Анализ исходных данных. Первым делом необходимо собрать все исходные данные из предыдущих этапов сквозного проекта: развёрнутую индикаторную диаграмму $p = f(\varphi)$ (из дисциплины Б1.1.20); диаметр цилиндра D (мм); ход поршня S (мм); номинальную частоту вращения n_N (мин$^{-1}$); число цилиндров i и порядок работы; 3D-модели деталей для определения масс. Если какие-либо данные отсутствуют или вызывают вопросы, их необходимо уточнить у руководителя.

Изучение литературы. Следующий шаг — подбор и изучение литературы по динамике поршневых двигателей. Рекомендуется использовать учебники Колчина А.И., Демидова В.П. «Расчёт автомобильных и тракторных двигателей», а также методические пособия кафедры.

Составление плана расчёта. На основе индивидуального задания составляется детальный план расчёта. План должен включать: кинематический расчёт; приведение масс; расчёт сил; построение полярной диаграммы; расчёт крутящего момента; анализ уравновешенности. План согласовывается с руководителем.

Выбор шага расчёта. Для динамического расчёта рекомендуется выбирать шаг угла поворота коленчатого вала $\Delta\varphi$ = 10° или 15° (всего 36 или 24 точки на один оборот). Для четырёхтактного двигателя расчёт выполняется на два оборота (720°). Шаг 10° даёт более точные результаты, но требует больше времени; шаг 15° — компромиссный вариант.

4.2. Кинематический расчёт кривошипно-шатунного механизма

Определение кинематического параметра λ. Кинематический параметр $\lambda = R / L$, где R — радиус кривошипа (половина хода поршня, $R = S/2$), L — длина шатуна. Рекомендуемые значения: для бензиновых двигателей λ = 0,24…0,32; для дизелей λ = 0,22…0,28. При отсутствии точных данных можно принять λ = 0,28 для бензиновых и λ = 0,26 для дизелей.

Расчёт перемещения поршня. Перемещение поршня от ВМТ (верхней мёртвой точки) определяется по приближённой формуле:

$S_x = R \times [(1 - cos\,\varphi) + (\lambda/2) \times (1 - cos\,2\varphi)]$, мм

где φ — угол поворота коленчатого вала от ВМТ, град; R — радиус кривошипа, мм; λ — кинематический параметр.

Расчёт скорости поршня. Скорость поршня определяется по приближённой формуле:

$V = \omega \times R \times (sin\,\varphi + (\lambda/2) \times sin\,2\varphi)$, м/с

где $\omega = \pi \times n / 30$ — угловая скорость коленчатого вала, рад/с; n — частота вращения, мин$^{-1}$.

Расчёт ускорения поршня. Ускорение поршня определяется по приближённой формуле:

$j = \omega^2 \times R \times (cos\,\varphi + \lambda \times cos\,2\varphi)$, м/с²

Пример расчёта для бензинового двигателя. Исходные данные: $S = 75$ мм, $R = 37{,}5$ мм, $\lambda = 0{,}28$, $n = 5500$ мин$^{-1}$, $\omega = 3{,}14 \times 5500 / 30 = 575{,}7$ рад/с. Для $\varphi = 0°$ (ВМТ): $S_x = 37{,}5 \times [(1 - 1) + 0{,}14 \times (1 - 1)] = 0$; $V = 575{,}7 \times 0{,}0375 \times (0 + 0) = 0$; $j = 575{,}7^2 \times 0{,}0375 \times (1 + 0{,}28) = 331\,400 \times 0{,}0375 \times 1{,}28 = 15\,900$ м/с². Для $\varphi = 90°$: $S_x = 37{,}5 \times [(1 - 0) + 0{,}14 \times (1 - (-1))] = 37{,}5 \times (1 + 0{,}14 \times 2) = 37{,}5 \times 1{,}28 = 48$ мм; $V = 575{,}7 \times 0{,}0375 \times (1 + 0) = 21{,}6$ м/с; $j = 331\,400 \times 0{,}0375 \times (0 - 0{,}28) = -3\,480$ м/с².

Результаты расчёта для всех углов φ (0, 10, 20, …, 360°) сводятся в таблицу. Строятся графики $S = f(\varphi), V = f(\varphi), j = f(\varphi)$. Графики строятся в одинаковом масштабе по оси φ для удобства сравнения.

4.3. Приведение масс деталей кривошипно-шатунного механизма

Определение масс деталей. Массы деталей могут быть определены по 3D-моделям (через плотность материала и объём) или по справочным данным. Типовые значения для двигателей среднего литража: масса поршневой группы $m_{\text{п}}$ = 0,4…0,8 кг; масса шатуна $m_{\text{ш}}$ = 0,5…1,2 кг; масса неуравновешенных частей коленчатого вала $m_{\text{к}}$ = 0,3…0,8 кг.

Приведение массы шатуна. Шатун заменяется двумя массами: $m_{\text{ш.п}}$ — масса, сосредоточенная на поршневом пальце

(совершает возвратно-поступательное движение); $m_{\text{ш.к}}$ — масса, сосредоточенная на кривошипной головке (совершает вращательное движение). Условия динамической эквивалентности:

$$m_{\text{ш}} = m_{\text{ш.п}} + m_{\text{ш.к}}$$
$$m_{\text{ш.п}} \times L_{\text{п}} = m_{\text{ш.к}} \times L_{\text{к}}$$
$$I_{\text{ш}} = m_{\text{ш.п}} \times L_{П}^{2} + m_{\text{ш.к}} \times L_{\text{к}}^{2}$$

Для приближённых расчётов можно принять: $m_{\text{ш.п}} = (0{,}2 \ldots 0{,}3) \times m_{\text{ш}}$, $m_{\text{ш.к}} = (0{,}7 \ldots 0{,}8) \times m_{\text{ш}}$.

Масса возвратно-поступательно движущихся частей. $m_{\text{вп}} = m_{\text{п}} + m_{\text{ш.п}}$.

Масса вращающихся частей. $m_{\text{вр}} = m_{\text{к}} + 2 \times m_{\text{ш.к}}$ (для одного цилиндра с учётом двух щёк коленчатого вала).

4.4. Расчёт сил, действующих в кривошипно-шатунном механизме

Сила давления газов. Сила давления газов определяется по развёрнутой индикаторной диаграмме: $P_{\text{г}} = (p - p_0) \times F_{\text{п}}$, кН, где p — давление газов в цилиндре при данном угле φ, МПа; $p_0 = 0{,}1$ МПа — атмосферное давление; $F_{\text{п}} = \pi \times D^2 / 4$ — площадь поршня, мм².

Сила инерции возвратно-поступательно движущихся масс. $P_j = -m_{\text{вп}} \times j$, кН, где j — ускорение поршня, м/с²; знак минус означает, что сила инерции направлена противоположно ускорению.

Суммарная сила, действующая на поршневой палец. $P_{\Sigma} = P_{\text{г}} + P_j$, кН.

Нормальная сила (сила, прижимающая поршень к стенке цилиндра). $N = P_{\Sigma} \times tg\,\beta$, кН, где β — угол отклонения шатуна от оси цилиндра, $\sin\beta = \lambda \times \sin\varphi$.

Сила, действующая вдоль шатуна. $S_{\text{ш}} = P_{\Sigma} / \cos\beta$, кН.

Тангенциальная сила (касательная к окружности кривошипа). $T = S_{\text{ш}} \times \sin(\varphi + \beta) = P_{\Sigma} \times \sin(\varphi + \beta) / \cos\beta$, кН.

Радиальная сила (действующая вдоль кривошипа). $K = S_{\text{ш}} \times \cos(\varphi + \beta) = P_{\Sigma} \times \cos(\varphi + \beta) / \cos\beta$, кН.

Пример расчёта для бензинового двигателя. При φ = 370° (начало рабочего хода) $p = 5{,}0$ МПа, $D = 82$ мм, $F_\text{п} = 3{,}14 \times 82^2 / 4 = 5\,280$ мм^2. $P_\text{г} = (5{,}0 - 0{,}1) \times 5\,280 / 1000 = 25{,}9$ кН. При $j = 15\,900$ м/с^2, $m_\text{вп} = 0{,}8$ кг, $P_j = -0{,}8 \times 15\,900 / 1000 = -12{,}7$ кН. $P_\Sigma = 25{,}9 - 12{,}7 = 13{,}2$ кН.

Результаты расчёта для всех углов φ сводятся в таблицу динамического расчёта.

4.5. Построение полярной диаграммы сил, действующих на шатунную шейку

Сила, действующая на шатунную шейку от одного шатуна. $R_\text{ш} = K + K_\text{ц}$, кН, где K — радиальная сила, $K_\text{ц} = m_\text{вр} \times \omega^2 \times R$ — центробежная сила инерции вращающихся масс (постоянна по величине и направлена по радиусу кривошипа).

Построение полярной диаграммы. Полярная диаграмма строится в координатах, вращающихся вместе с шатунной шейкой. Для каждого угла φ откладывается вектор $R_\text{ш}$ в направлении, определяемом углом φ. Концы векторов соединяются плавной кривой. Масштаб выбирается так, чтобы диаграмма занимала не менее половины листа (рекомендуемый масштаб: 1 см = 2…5 кН).

Диаграмма износа шатунной шейки. Диаграмма износа строится на основе полярной диаграммы методом суммирования векторов сил. В каждой точке поверхности шейки (через каждые 10° по окружности) суммируются проекции всех векторов $R_\text{ш}$ на направление данной точки. Полученные значения откладываются в виде радиус-векторов от центра шейки. Диаграмма износа позволяет определить зоны минимального износа, где следует располагать масляное отверстие.

4.6. Расчёт суммарного крутящего момента и маховика

Крутящий момент одного цилиндра. $M_\text{кр} = T \times R$, Н·м, где T — тангенциальная сила, кН; R — радиус кривошипа, м.

Суммарный крутящий момент многоцилиндрового двигателя. $M_{\text{сум}} = \Sigma M_{\text{кр}.i}$, Н·м. Суммирование производится с учётом порядка работы цилиндров. Для рядного четырёхцилиндрового двигателя с порядком работы 1-3-4-2 угловые интервалы между рабочими ходами составляют 180°. Для V-образного двигателя — с учётом угла развала.

Расчёт маховика. Момент инерции маховика определяется по формуле: $I_{\text{м}} = L_{\text{изб}} / (\delta \times \omega_{Cp}^2)$, кг·м², где $L_{\text{изб}}$ — избыточная работа (площадь на графике суммарного крутящего момента выше линии среднего момента), Дж; δ — степень неравномерности хода (для легковых автомобилей δ = 1/80…1/150); $\omega_{\text{ср}}$ — средняя угловая скорость, рад/с.

4.7. Анализ уравновешенности двигателя

Силы инерции возвратно-поступательно движущихся масс первого порядка. $\Sigma P_{j1} = 0$ для двигателей с числом цилиндров $i \geq 4$ при равномерном чередовании вспышек.

Силы инерции возвратно-поступательно движущихся масс второго порядка. $\Sigma P_{j2} = 0$ для двигателей с $i \geq 6$. Для четырёхцилиндровых двигателей силы второго порядка не уравновешены и достигают значительных величин.

Центробежные силы. $\Sigma K_{\text{ц}} = 0$ при установке противовесов на коленчатом валу.

Моменты от сил инерции. Для рядных двигателей с $i \geq 4$ моменты от сил первого порядка обычно уравновешены. Моменты от сил второго порядка требуют установки балансирных валов.

4.8. Типичные ошибки и способы их предотвращения

Ошибка: Неправильное определение углов поворота коленчатого вала для четырёхтактного двигателя (забывают, что рабочий цикл составляет 720°). **Как избежать:** Чётко помнить, что для четырёхтактного двигателя расчёт выполняется на 720°, для двухтактного — на 360°.

Ошибка: Путаница между радианной и градусной мерой угла при расчёте тригонометрических функций. **Как избежать:** В Excel использовать функции SIN(радианы) и COS(радианы). При ручном расчёте переводить градусы в радианы.

Ошибка: Неправильное определение знака сил инерции (знак минус в формуле $P_j = -m \times j$). **Как избежать:** Всегда помнить, что сила инерции направлена противоположно ускорению.

Ошибка: Неправильное суммирование крутящих моментов (не учтён порядок работы цилиндров). **Как избежать:** Тщательно построить таблицу суммирования с указанием фаз для каждого цилиндра.

Ошибка: Построение полярной диаграммы в неподвижной системе координат (вместо вращающейся вместе с шейкой). **Как избежать:** Строить диаграмму в координатах, повёрнутых на угол φ.

Раздел 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. Кинематический расчёт кривошипно-шатунного механизма», «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. Текст пункта списка может начинаться со

строчной буквы (если пункт не является законченным предложением) или с прописной буквы (если пункт представляет собой законченное предложение). В конце каждого пункта ставится точка с запятой, кроме последнего пункта, после которого ставится точка.

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). Следует избегать избыточных выделений.

5.3. Оформление иллюстраций (рисунков)

Виды иллюстраций. В пояснительной записке могут быть представлены рисунки различных типов: графики кинематических характеристик (S, V, j), развёрнутая индикаторная диаграмма, графики тангенциальной и радиальной сил, полярная диаграмма, диаграмма износа, график суммарного крутящего момента. Все иллюстрации именуются рисунками.

Нумерация рисунков. Рисунки нумеруются арабскими цифрами. Рекомендуется нумерация в пределах раздела (рисунок 1.1, рисунок 1.2, рисунок 2.1 и т.д.). Номер рисунка указывается после его подписи.

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 1.1 — Перемещение поршня в функции угла поворота коленчатого вала».

Ссылки на рисунки в тексте. В тексте записки должны быть ссылки на все рисунки. Ссылка оформляется в виде «(рисунок 1.1)» или «как показано на рисунке 1.1». Не допускается использовать обороты «на следующем рисунке», «на рисунке ниже».

Требования к качеству иллюстраций. Все иллюстрации должны быть чёткими, с читаемыми надписями. Графики должны быть построены на миллиметровой бумаге или с использованием графических средств Excel. На осях графиков должны быть

указаны обозначения и единицы измерения величин. Масштаб должен обеспечивать наглядность.

5.4. Оформление таблиц

Нумерация таблиц. Таблицы нумеруются арабскими цифрами аналогично рисункам: нумерация в пределах раздела (таблица 1.1, таблица 1.2, таблица 2.1 и т.д.). Номер таблицы указывается в её заголовке.

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. Точка в конце заголовка не ставится. Пример: «Таблица 1.1 — Кинематические характеристики поршня».

Оформление шапки таблицы. Заголовки граф (шапка таблицы) печатаются полужирным шрифтом, выравниваются по центру. Единицы измерения величин указываются в заголовках граф после запятой. Пример: «Угол φ, град», «Перемещение S, мм».

Большие таблицы. Если таблица не помещается на одной странице, её переносят на следующую страницу. При переносе на следующей странице над продолжением таблицы пишут «Продолжение таблицы 1.1» (выравнивание по правому краю). Заголовок таблицы на следующей странице не повторяется, но повторяется шапка (заголовки граф). Допускается нумеровать графы и на следующей странице приводить только их номера.

Ссылки на таблицы в тексте. В тексте записки должны быть ссылки на все таблицы. Ссылка оформляется в виде «(таблица 1.1)» или «как показано в таблице 1.1».

5.5. Оформление формул

Набор формул. Формулы набираются с использованием редактора формул (Microsoft Equation, MathType или встроенный редактор LibreOffice Math). Не допускается вставка формул в виде

изображений. Переменные в формулах обозначаются курсивом (латинскими или греческими буквами), а константы, индексы и пояснения — прямым шрифтом.

Нумерация формул. Формулы нумеруются арабскими цифрами. Номер указывается в круглых скобках у правого края строки, на уровне формулы. Рекомендуется нумерация в пределах раздела (1.1, 1.2, 2.1 и т.д.). Пример:

$$S_x = R \times [(1 - cos\,\varphi) + (\lambda/2) \times (1 - cos\,2\varphi)] \qquad (1.1)$$

Расположение формул. Формула располагается на отдельной строке, выравнивается по центру. Выше и ниже формулы оставляется по одной пустой строке. Пояснения символов (расшифровка буквенных обозначений) приводятся после формулы под словом «где» (без двоеточия). Пояснения располагаются столбиком: сначала указывается символ, затем тире, затем расшифровка.

Ссылки на формулы в тексте. В тексте записки должны быть ссылки на все формулы. Ссылка оформляется в виде «в формуле (1.1)» или «по формуле (1.1)».

5.6. Оформление ссылок и списка литературы

Ссылки на литературу в тексте. Библиографические ссылки в тексте оформляются в квадратных скобках. В скобках указывается номер источника по списку литературы. При необходимости указывается номер страницы через запятую. Пример: «…согласно данным [5, с. 44]» или «…в работе [7] показано, что…».

Состав списка литературы. Список литературы должен включать все источники, на которые есть ссылки в тексте. Рекомендуемое количество источников — не менее 10–15. Список оформляется в алфавитном порядке.

Оформление библиографических записей. Библиографические записи оформляются в соответствии с ГОСТ 7.1-2003. Примеры оформления приведены в разделе 10 настоящего пособия.

5.7. Оформление приложений

Приложения содержат вспомогательные материалы: таблицу динамического расчёта (сводная таблица сил для всех углов поворота коленчатого вала), распечатки расчётов в Excel, дополнительные графики. Каждое приложение начинается с новой страницы. Вверху страницы по центру пишется слово «Приложение» с указанием обозначения (А, Б, В). Приложения включаются в общую нумерацию страниц.

Раздел 6. Требования к оформлению графической части

6.1. Состав графической части

Графическая часть курсового проекта включает следующие материалы, которые могут быть представлены на отдельных листах формата А3 или А4 либо включены в пояснительную записку в качестве иллюстраций.

Графики кинематических характеристик (1 лист): перемещение поршня $S = f(\varphi)$, скорость поршня $V = f(\varphi)$, ускорение поршня $j = f(\varphi)$.

Развёрнутая индикаторная диаграмма (1 лист) в координатах p–φ.

Графики тангенциальной и радиальной сил (1 лист): $T = f(\varphi)$ и $K = f(\varphi)$.

Полярная диаграмма сил, действующих на шатунную шейку (1 лист).

Диаграмма износа шатунной шейки (1 лист).

График суммарного крутящего момента двигателя (1 лист): $M_{\text{сум}} = f(\varphi)$.

6.2. Требования к выполнению графиков

Масштабы. По оси абсцисс (угол поворота коленчатого вала φ) рекомендуется масштаб: 10 мм = 30° для четырёхтактного

двигателя (720° — 240 мм). По оси ординат масштаб выбирается в зависимости от величины параметра: для перемещения — 1 мм = 1 мм; для скорости — 1 мм = 1 м/с; для ускорения — 1 мм = 500 м/с²; для сил — 1 мм = 1 кН.

Построение графиков. Графики строятся на миллиметровой бумаге или с использованием графических средств Excel. На осях должны быть указаны обозначения величин и единицы измерения. Графики должны быть аккуратными, линии — чёткими. Характерные точки (максимумы, минимумы, нули) должны быть подписаны.

Оформление. Каждый график должен иметь подпись (например, «Рисунок 1 — Перемещение поршня в функции угла поворота коленчатого вала»). Подпись располагается под графиком.

6.3. Требования к выполнению полярной диаграммы

Полярная диаграмма сил, действующих на шатунную шейку, строится на листе формата А3 или А4. Масштаб выбирается так, чтобы диаграмма занимала не менее половины листа (рекомендуемый масштаб: 1 см = 2…5 кН). Диаграмма строится в координатах, вращающихся вместе с шатунной шейкой. На диаграмме отмечаются зоны минимального износа для выбора расположения масляного отверстия.

6.4. Требования к презентации (при наличии)

При необходимости (по требованию руководителя) результаты курсового проекта могут быть представлены в виде презентации. Рекомендуемое количество слайдов — 10–14. Структура презентации: титульный слайд; цель и задачи; исходные данные; кинематические характеристики; силы, действующие в КШМ; полярная диаграмма; суммарный крутящий момент; уравновешивание; выводы. Оформление презентации: единый стиль, светлый фон, тёмный текст, шрифт для заголовков 28–32 пункта, для основного текста 20–24 пункта.

Раздел 7. Программное обеспечение и инструменты

7.1. Основное программное обеспечение

Для выполнения курсового проекта по дисциплине «Динамический расчет поршневых двигателей» студенту может потребоваться следующее программное обеспечение.

Microsoft Excel (версия 2016 или выше). Это основной инструмент для выполнения динамического расчёта. Excel позволяет создавать таблицы динамического расчёта с автоматическим пересчётом формул, строить графики кинематических характеристик, сил, крутящего момента. Рекомендуется создать книгу Excel с несколькими листами: «Кинематика», «Исходные данные», «Таблица динамического расчёта», «Графики». Студенческая версия Microsoft 365 доступна бесплатно для студентов Московского политехнического университета.

Mathcad (версия Prime или выше). Альтернативный инструмент для выполнения инженерных расчётов. Mathcad позволяет записывать формулы в математической нотации, автоматически пересчитывать результаты, строить графики. Студенческая версия доступна на сайте PTC Education.

MATLAB (версия с Toolbox). Для студентов, желающих углублённо изучить методы динамического анализа, может быть использован MATLAB. Позволяет выполнять гармонический анализ сил, строить полярные диаграммы, анализировать уравновешенность. Студенческая версия доступна на сайте MathWorks.

КОМПАС-3D или SolidWorks (для определения масс деталей). Используются для определения масс деталей по 3D-моделям, созданным на втором этапе сквозного проекта. В программах имеются инструменты для определения масс-центровочных характеристик.

7.2. Вспомогательное программное обеспечение

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

Adobe Acrobat Reader или любой другой PDF-просмотрщик. Для просмотра и проверки готовых материалов в формате PDF.

PDF-принтер (например, PDF Creator или встроенный в Windows «Microsoft Print to PDF»). Для конвертации пояснительной записки и графических материалов в формат PDF.

Архиватор (7-Zip, WinRAR). Для упаковки электронного архива при сдаче работы.

7.3. Учебные ресурсы по программному обеспечению

По Microsoft Excel: на платформе Microsoft Learn доступны бесплатные курсы по работе с формулами, построению диаграмм, анализу данных. На YouTube — многочисленные видеоуроки по Excel для инженерных расчётов.

По Mathcad: на сайте PTC Education доступны учебные пособия и вебинары. Встроенная справка Mathcad содержит множество примеров.

По MATLAB: на сайте MathWorks доступны бесплатные онлайн-курсы MATLAB Academy.

7.4. Требования к форматам сдаваемых файлов

Пояснительная записка: файл в исходном формате (.docx) и в формате .pdf.

Таблица динамического расчёта: файл в формате .xlsx (Excel) или .xmcd (Mathcad).

Графические материалы: файлы в форматах .pdf, .jpg или .png (допускается включение в пояснительную записку).

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_Б1.2.4»). Внутри располагаются папки: «Report» (пояснительная записка), «Calculations» (файл расчёта), «Graphics» (графические материалы), «Presentation» (презентация). Все файлы должны быть названы в соответствии с их содержанием.

Раздел 8. Организация выполнения и защиты курсового проекта

8.1. Календарный план выполнения курсового проекта

Курсовой проект выполняется в пятом семестре. Рекомендуемый календарный план:

1–2 недели. Получение задания, сбор исходных данных, подбор литературы.

3–4 недели. Кинематический расчёт КШМ. Построение графиков S, V, j.

5–8 недели. Динамический расчёт: приведение масс, расчёт сил, заполнение таблицы динамического расчёта.

9–10 недели. Построение полярной диаграммы и диаграммы износа.

11–12 недели. Расчёт суммарного крутящего момента и маховика. Анализ уравновешенности.

13–15 недели. Оформление пояснительной записки и графических материалов.

16–18 недели. Сдача работы на проверку, нормоконтроль, защита.

8.2. Взаимодействие с руководителем

Консультации проводятся не реже одного раза в две недели. На каждой консультации студент показывает результаты выполнения этапа. Формы промежуточной отчётности: проверка кинематического расчёта (4 неделя), проверка таблицы динамического расчёта (8 неделя), проверка полярной диаграммы (10 неделя), проверка пояснительной записки (15 неделя).

8.3. Порядок сдачи курсового проекта

После завершения работы студент проходит нормоконтроль, который проверяет соответствие оформления требованиям. Затем работа сдаётся руководителю. Для сдачи предоставляются: пояснительная записка (распечатанная и в электронном виде), графические материалы (распечатанные и в электронном виде), файл расчёта, электронный архив.

8.4. Защита курсового проекта

Защита проводится в форме дифференцированного зачёта. Студент выступает с докладом (5–7 минут), в котором освещает: цель и задачи, тип двигателя, основные результаты (максимальные силы, нагрузки на шейки, уравновешенность), связь с прочностным расчётом. Доклад сопровождается презентацией.

После доклада руководитель задаёт вопросы по содержанию работы. Вопросы могут касаться: кинематики КШМ, определения сил инерции, построения полярной диаграммы, уравновешенности двигателя.

8.5. Критерии оценки

Оценка «отлично» — задание выполнено в полном объёме и в срок, расчёты верны, графики и диаграммы построены правильно, пояснительная записка оформлена безупречно, студент глубоко понимает материал и свободно отвечает на вопросы.

Оценка «хорошо» — задание выполнено, есть незначительные замечания по содержанию или оформлению.

Оценка «удовлетворительно» — задание выполнено, но имеются существенные замечания, студент отвечает с трудом.

Оценка «неудовлетворительно» — задание не выполнено или выполнено с грубыми нарушениями.

Раздел 9. Критерии оценки курсового проекта

Оценка курсового проекта по дисциплине «Динамический расчет поршневых двигателей» осуществляется по четырёхбалльной шкале: «отлично», «хорошо», «удовлетворительно», «неудовлетворительно». При выставлении оценки учитываются правильность выполнения кинематического и динамического расчётов, качество построения графиков и диаграмм, полнота пояснительной записки, соблюдение сроков выполнения этапов, а также уровень понимания динамики кривошипно-шатунного механизма, 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. Кинематический расчёт выполнен правильно: определены перемещение, скорость и ускорение поршня для всех характерных углов поворота коленчатого вала; графики S, V, j построены аккуратно, с соблюдением масштабов. Приведение масс деталей выполнено корректно, массы возвратно-поступательно и вращательно движущихся частей определены верно.

Динамический расчёт выполнен без ошибок: силы давления газов, силы инерции, суммарные силы, тангенциальная и радиальная составляющие рассчитаны для всех углов поворота. Таблица динамического расчёта оформлена аккуратно, содержит

все необходимые колонки. Полярная диаграмма сил, действующих на шатунную шейку, построена правильно, масштаб выбран удачно, диаграмма занимает не менее половины листа. Диаграмма износа построена корректно, зоны минимального износа определены верно, дана рекомендация по расположению масляного отверстия.

Суммарный крутящий момент рассчитан с учётом порядка работы цилиндров, график $M_{\text{сум}} = f(\varphi)$ построен правильно, средний крутящий момент определён, выполнен расчёт маховика. Анализ уравновешенности двигателя выполнен полно: определены силы инерции первого и второго порядка, центробежные силы, моменты от этих сил, даны рекомендации по уравновешиванию (противовесы, балансирные валы).

Пояснительная записка оформлена безупречно в соответствии с требованиями ЕСКД. Все графики и диаграммы имеют подписи и ссылки в тексте. При защите студент демонстрирует глубокое понимание динамики кривошипно-шатунного механизма, свободно объясняет происхождение сил инерции, принципы уравновешивания, аргументированно отвечает на все вопросы, показывает понимание связи данной работы с последующим прочностным расчётом.

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: в кинематическом расчёте допущены незначительные арифметические ошибки; графики построены с небольшими отклонениями от табличных данных; в таблице динамического расчёта пропущены одна-две колонки или не все углы; полярная диаграмма построена с небольшими погрешностями; анализ уравновешенности выполнен не в полном объёме (не учтены моменты от сил второго порядка); 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: кинематический расчёт выполнен с ошибками (неправильное определение ускорения, неверный параметр λ); приведение масс выполнено неверно; в динамическом расчёте допущены ошибки в определении сил; таблица динамического расчёта отсутствует или заполнена не полностью; полярная диаграмма не построена или построена в неподвижной системе координат; анализ уравновешенности не выполнен; 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 расчёт, нет пояснительной записки, не построены диаграммы). Либо задание выполнено с грубыми нарушениями: кинематические зависимости выведены неверно; динамический расчёт отсутствует; полярная диаграмма не соответствует методике; таблица динамического расчёта отсутствует; пояснительная записка отсутствует или

имеет объём менее 15 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 недостатки и представить работу к повторной защите.

Раздел 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 примеры расчёта с реальными цифрами.

Луканин В.Н., Морозов К.А., Хачиян А.С. Двигатели внутреннего сгорания: учебник для вузов. В 3 кн. Кн. 1. Теория рабочих процессов. — 2-е изд. — М.: Высшая школа, 2015. — 479 с. В учебнике изложены основы динамического расчёта кривошипно-шатунного механизма.

Дьяченко В.Г. Теория двигателей внутреннего сгорания: учебник для вузов. — М.: Машиностроение, 2017. — 432 с.

10.2. Дополнительная литература

Абрамчук Ф.И., Кислов В.Г. Динамический расчёт поршневых двигателей: методические указания к курсовому проекту. — М.: МАМИ, 2018. — 56 с.

Крутов В.И. Автомобильные двигатели: теория и расчёт: учебное пособие. — М.: Машиностроение, 2018. — 320 с.

10.3. Периодические издания

«Двигателестроение». Межотраслевой научно-технический журнал. ISSN: 0202-1633. В журнале публикуются статьи по динамике и уравновешиванию поршневых 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.

Intuit.ru — курс «Двигатели внутреннего сгорания».

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.

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. В реальном пособии этот шаблон приводится в виде полностью оформленного образца на отдельной странице.

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 «Динамический расчет поршневых двигателей»

на тему: «Динамический расчёт рядного четырёхцилиндрового бензинового двигателя для легкового автомобиля»

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. Задание подписывается студентом и руководителем, после чего утверждается заведующим кафедрой.

Ниже приведён шаблон индивидуального задания. В реальном пособии этот шаблон приводится в виде заполненного образца для конкретной темы.

ИНДИВИДУАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ № 3

на выполнение курсового проекта по дисциплине «Динамический расчет поршневых двигателей»

Студент: Иванов Иван Иванович, группа 241-111

Тема курсового проекта: Динамический расчёт рядного четырёхцилиндрового бензинового двигателя для легкового автомобиля

Исходные данные:

- Тип двигателя: бензиновый, четырёхтактный, рядный
- Число цилиндров: $i = 4$
- Порядок работы цилиндров: 1-3-4-2
- Диаметр цилиндра: $D = 82$ мм
- Ход поршня: $S = 75$ мм
- Номинальная частота вращения: $n_N = 5500$ мин$^{-1}$

- Степень сжатия: $\varepsilon = 9{,}5$
- Масса поршневой группы: $m_{\text{п}} = 0{,}6$ кг (по 3D-модели)
- Масса шатуна: $m_{\text{ш}} = 0{,}8$ кг (по 3D-модели)
- Развёрнутая индикаторная диаграмма $p = f(\varphi)$ — из теплового расчёта

Перечень подлежащих разработке вопросов:

- выполнить кинематический расчёт КШМ;
- выполнить приведение масс деталей КШМ;
- рассчитать силы, действующие в КШМ;
- построить полярную диаграмму сил на шатунную шейку;
- построить диаграмму износа шатунной шейки;
- рассчитать суммарный крутящий момент и маховик;
- выполнить анализ уравновешенности двигателя.

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

Календарный план содержит перечень этапов выполнения курсового проекта с указанием сроков начала и окончания каждого этапа. Календарный план составляется студентом совместно с руководителем в начале семестра.

Ниже приведён образец календарного плана в виде таблицы.

Таблица В.1

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

№ п/п	Наименование этапа	Срок начала	Срок окончания	Отметка о выполнении
1	Получение задания, сбор исходных данных	01.02.2026	14.02.2026	

№ п/п	Наименование этапа	Срок начала	Срок окончания	Отметка о выполнении
2	Кинематический расчёт КШМ	15.02.2026	28.02.2026	
3	Приведение масс деталей	01.03.2026	07.03.2026	
4	Расчёт сил давления газов и сил инерции	08.03.2026	21.03.2026	
5	Расчёт тангенциальной и радиальной сил	22.03.2026	04.04.2026	
6	Заполнение таблицы динамического расчёта	05.04.2026	11.04.2026	
7	Построение полярной диаграммы	12.04.2026	18.04.2026	
8	Расчёт суммарного крутящего момента	19.04.2026	25.04.2026	
9	Анализ уравновешенности	26.04.2026	02.05.2026	

№ п/п	Наименование этапа	Срок начала	Срок окончания	Отметка о выполнении
10	Оформление пояснительной записки	03.05.2026	09.05.2026	
11	Сдача работы на проверку	10.05.2026	16.05.2026	
12	Защита курсового проекта	01.06.2026	05.06.2026	

Приложение Г. Образец рабочего дневника студента

Рабочий дневник служит для фиксации хода выполнения курсового проекта. В дневнике студент отражает даты выполнения работ, затраченное время, возникшие трудности и рекомендации руководителя.

Ниже приведён образец рабочего дневника в виде таблицы.

Таблица Г.1

Рабочий дневник студента Иванова И.И., группа 241-111, по курсовому проекту «Динамический расчёт рядного четырёхцилиндрового бензинового двигателя»

Дата	Вид выполненной работы	Затраченное время (часы)	Возникшие трудности	Рекомендации руководителя	Отметка о выполнении
05.02	Сбор исходных данных	2	Нет	—	+

Дата	Вид выполненной работы	Затраченное время (часы)	Возникшие трудности	Рекомендации руководителя	Отметка о выполнении
10.02	Консультация с руководителем	1	—	Уточнить λ	+
15.02	Кинематический расчёт	4	Сложности с тригонометрией	Проверить размерности	+
20.02	Построение графиков S, V, j	3	Нет	—	+
…	…	…	…	…	…

Приложение Д. Пример оформления графиков и диаграмм

В данном приложении приводится пример оформления графиков кинематических характеристик, полярной диаграммы и диаграммы износа. В реальном пособии на отдельных страницах помещаются образцы графиков с соблюдением масштабов, подписей осей и единиц измерения. Пример подписи: «Рисунок Д.1 — Полярная диаграмма сил, действующих на шатунную шейку».

Приложение Е. Пример таблицы динамического расчёта

В данном приложении приводится фрагмент таблицы динамического расчёта (на 5–10 углов) с указанием всех колонок

и единиц измерения. В реальном пособии таблица приводится на отдельной странице формата A3 или A4 в альбомной ориентации.

Таблица Е.1

Динамический расчёт двигателя (фрагмент)

φ, град	p, МПа	P_г, кН	P_j, кН	P_Σ, кН	N, кН	S_ш, кН	T, кН	K, кН	M_кр, Н·м
0	0,12	0,6	-12,7	-12,1	0	-12,1	0	-12,1	0
10	0,12	0,6	-12,4	-11,8	0,5	-11,8	0,6	-11,7	11
…	…	…	…	…	…	…	…	…	…

Приложение Ж. Перечень вопросов для защиты курсового проекта

Примерные вопросы для защиты курсового проекта:

1. Какова цель динамического расчёта и как он связан с третьим этапом сквозного проекта?
2. Что такое кинематический параметр λ и как он влияет на движение поршня?
3. Как определяется сила инерции возвратно-поступательно движущихся масс?
4. Как разлагается суммарная сила, действующая на поршневой палец?
5. Что такое тангенциальная и радиальная силы? Как они рассчитываются?
6. Как строится полярная диаграмма сил, действующих на шатунную шейку?
7. Для чего служит диаграмма износа шатунной шейки?

8. Как определяется суммарный крутящий момент многоцилиндрового двигателя?

9. Что такое степень неравномерности хода двигателя и как рассчитывается маховик?

10. Какие силы и моменты нарушают уравновешенность двигателя? Как они уравновешиваются?

11. Как результаты динамического расчёта используются в прочностном расчёте?

Приложение 3. Образец презентации (миниатюры слайдов)

В данном приложении приводится образец презентации для защиты курсового проекта в виде миниатюр слайдов. Рекомендуемое количество слайдов — 10–14. Структура слайдов: титульный слайд; цель и задачи; исходные данные; кинематические характеристики; графики тангенциальной и радиальной сил; полярная диаграмма; суммарный крутящий момент; уравновешивание; выводы. В реальном пособии каждый слайд представляется в виде уменьшенной копии (скриншота) с указанием номера слайда и его содержания.

Заключение

Настоящее учебное пособие предназначено для оказания методической помощи студентам при выполнении курсового проекта по дисциплине «Динамический расчет поршневых двигателей». В пособии последовательно изложены все этапы работы: от кинематического расчёта кривошипно-шатунного механизма до построения полярных диаграмм, расчёта суммарного крутящего момента и анализа уравновешенности двигателя.

Особое внимание уделено месту данного курсового проекта в структуре сквозного проектирования. Результаты динамического расчёта — силы, действующие на шатунную шейку коленчатого вала — являются основой для задания граничных условий при прочностном расчёте деталей кривошипно-шатунного механизма в курсовом проекте по дисциплине «Конструирование и расчет поршневых двигателей». Без правильно выполненного динамического расчёта невозможно корректно определить напряжения и деформации в деталях, что делает этот этап критически важным для обеспечения прочности и надёжности проектируемого двигателя.

Успех в выполнении курсового проекта зависит от трёх составляющих: внимательного изучения теоретического материала, аккуратного выполнения расчётов с проверкой размерностей и физической достоверности результатов, а также своевременных консультаций с руководителем. Не откладывайте работу на последние недели семестра — динамический расчёт требует времени и внимания к деталям. Ошибки, обнаруженные на поздних этапах, исправлять значительно труднее.

Регулярно консультируйтесь с руководителем, показывайте промежуточные результаты, не стесняйтесь задавать вопросы. Руководитель заинтересован в вашем успехе и готов помочь разобраться в сложных вопросах динамики кривошипно-шатунного механизма.

Желаем вам успешного выполнения курсового проекта, глубокого понимания динамических процессов, происходящих в поршневых двигателях, и уверенного применения полученных знаний на последующих этапах сквозного проекта. Пусть этот

третий этап станет прочным фундаментом для создания надёжного и сбалансированного двигателя.

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.

11. Eichlseder H., Baumann E., Muller P., Neugebauer S. Chansen und Risiken von Ottomotoren mit Direkteinspritzung // MTZ. N 3. 2000. S.144-152.

12. Hoppe N., Weberbauer F., Woschni G., Zeilinger K. Experimentel-le Erfassung und Simulation des Betriebsverhaltens von Ottomotoren mit Direkteinspritzung // MTZ. N 7/8. 2003. S. 628-635.