

Белорусский национальный технический университет

Факультет автотракторный
Кафедра «Двигатели внутреннего сгорания»

СОГЛАСОВАНО

Заведующий кафедрой

_____ 2013 г.

СОГЛАСОВАНО

Декан факультета

_____ 2013 г.

**ЭЛЕКТРОННЫЙ УЧЕБНО – МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС
ПО УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЕ**

Математическое моделирование производственных процессов
для специальности 1- 37 01 01 «Двигатели внутреннего сгорания»

Составитель: доцент Бармин В.А.

Рассмотрено и утверждено
на заседании Совета автотракторного факультета 25 ноября 2013 г.
протокол № 3

Перечень материалов

В ЭУМК включены следующие материалы: учебные планы по специальности 1- 37 01 01 «Двигатели внутреннего сгорания» для дневной и заочной форм получения образования; базовая и рабочая учебные программы по дисциплине; перечень тем лекционных занятий и их содержание; перечень тем лабораторных занятий; конспект лекций по дисциплине; методические указания по выполнению лабораторных работ; перечень вопросов для итоговой аттестации (зачёт); список рекомендуемой литературы.

Пояснительная записка

Электронный учебно – методический комплекс предназначен для реализации образовательной программы по дисциплине «Математическое моделирование производственных процессов». Целью изучения дисциплины является изучение будущими специалистами по конструированию и эксплуатации двигателей внутреннего сгорания вопросов теории моделирования, методов математического моделирования двигателей внутреннего сгорания на микро-, макро-, и метауровнях и технологии разработки моделей. Дисциплина базируется на изученных ранее общенаучных, общепрофессиональных и специальных дисциплинах. В результате изучения дисциплины будущий специалист должен иметь представление об основных методах математического моделирования; знать к какому уровню моделирования относится разрабатываемая математическая модель и использовать соответствующий математический аппарат; владеть приёмами создания математических моделей; уметь правильно сформулировать цель разработки математической модели, её структуру, алгоритм функционирования, провести вычислительный эксперимент и оценить полученные результаты.

Поддача учебного материала осуществляется в соответствии с учебно – методической картой рабочей учебной программы по дисциплине, которая включена в комплект материалов ЭУМК.

Оформление и использование ЭУМК по дисциплине осуществляется в соответствии с требованиями межгосударственного стандарта ГОСТ 7.83 – 2001 «Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Электронные издания. Основные виды и выходные сведения», а также СТП СМК БНТУ 6.3 – 02 – 2013 и требованиями СТБ ISO – 9001 - 2009 п. 6.3 «Инфраструктура». Структура комплекса даёт возможность правильно реализовать процесс теоретического обучения, практического использования при проведении лабораторных занятий и выполнении курсовой работы под контролем преподавателя и ориентирует обучающегося на применении знаний для разработки математических моделей для двигателей внутреннего сгорания.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	5
1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ	7
1.1 Перечень тем лекционных занятий и их содержание по дисциплине «Математическое моделирование производственных процессов»	7
1.2 Конспект лекций по дисциплине «Математическое моделирование производственных процессов»	8
1.2.1.1. Понятия объекта и модели	10
1.2.1.2. Из истории развития моделирования	15
1.2.1.3. Классификация моделей	16
1.2.1.4. Системные представления в моделировании	18
1.2.1.5. Моделирование в процессе проектирования технических систем ..	21
1.2.2 МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ	22
1.2.2.1 Понятие математической модели	22
1.2.2.2. Классификация математических моделей	22
1.2.2.3. Структура математических моделей	25
1.2.2.4. Формы представления математических моделей	26
1.2.2.5. Требования к математическим моделям	27
1.2.2.6. Объекты математического моделирования	28
1.2.3. ТЕХНОЛОГИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ	31
1.2.3.1. Определение целей и задач моделирования	31
1.2.3.2. Определение объекта моделирования	33
1.2.3.3. Составление содержательного описания	33
1.2.3.4. Разработка концептуальной модели	34
1.2.3.5. Составление формального описания	34
1.2.3.6. Преобразование формального описания в математическую модель	34
1.2.3.7. Алгоритмизация и программирование модели	36
1.2.3.8. Отладка математической модели	37
1.2.3.8.1. Испытание математической модели	38
1.2.3.8.2. Исследование свойств математической модели	39
1.2.3.8.3. Упрощение модели	39
1.2.3.8.4. Вычислительный эксперимент	40
1.2.3.9 Эксплуатация модели	41
1.2.4. ТИПОВЫЕ МОДЕЛИ ЭЛЕМЕНТОВ ДВС	42
1.2.4.1 Моделирование элементов ДВС на микроуровне	42
1.2.4.1.1 Предпосылки разработки математических моделей на микроуровне	42
1.2.4.1.1.1 Уравнение переноса субстанции	43
1.2.4.1.1.2 Уравнение сплошности	45
1.2.4.1.1.3 Уравнение движения	45
1.2.4.1.1.4 Уравнение энергии	46
1.2.4.1.2 Механика упругого твердого тела	47
1.2.4.1.3 Механика жидкостей и газов	49
1.2.4.1.4. Моделирование теплового состояния	50

1.2.4.1.5. Численные методы решения для моделирования элементов ДВС на микроуровне.....	50
1.2.4.1.5.1 Метод сеток.....	50
1.2.4.1.5.2 Метод конечных элементов	53
1.2.4.2. Моделирование элементов ДВС на макроуровне.....	56
1.2.4.2.1. Предпосылки разработки моделей на макроуровне	56
1.2.4.2.2. Моделирование механических систем.....	57
1.2.4.2.2.1. Моделирование механических поступательных систем.....	59
1.2.4.2.2.2. Моделирование механических вращательных систем	61
1.2.4.2.3. Моделирование газодинамических систем.	63
1.2.4.2.4. Моделирование тепловых систем.....	65
1.2.4.4. Статистические модели	67
1.2.4.4.1. Планирование эксперимента.....	68
1.2.4.4.2. Обработка результатов эксперимента.....	70
1.2.4.5. Система математических моделей ДВС	71
2. ПРАКТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ	73
2.1 Перечень тем лабораторных занятий по дисциплине «Математическое моделирование производственных процессов».....	73
2.2 Методические указания для выполнения лабораторных работ по дисциплине «Математическое моделирование производственных процессов»	74
2.3 Перечень тем курсовых работ по дисциплине «Математическое моделирование производственных процессов».....	111
3. РАЗДЕЛ КОНТРОЛЯ ЗНАНИЙ	112
3.1 Перечень вопросов для текущей и итоговой аттестации (зачёт).....	112
4. ВСПОМАГАТЕЛЬНЫЙ РАЗДЕЛ	114
4.1 Типовой учебный план для специальности 1-37 01 01 «Двигатели внутреннего сгорания»	114
4.2 Рабочий учебный план для специальности 1-37 01 01 «Двигатели внутреннего сгорания» дневная формы обучения	116
4.3 Рабочий учебный план для специальности 1-37 01 01 «Двигатели внутреннего сгорания» заочной формы обучения	118
4.4 Базовая учебная программа по дисциплине «Математическое моделирование производственных процессов» для специальности 1-37 01 01 «Двигатели внутреннего сгорания»	120
4.5 Рабочая учебная программа по дисциплине «Математическое моделирование производственных процессов» для специальности 1-37 01 01 «Двигатели внутреннего сгорания»	128
4.6 Список рекомендуемой литературы	139

Введение

Учебная программа «Математическое моделирование производственных процессов» разработана в соответствии с Образовательным стандартом 2008г., для специальности 1-37.01.01 «Двигатели внутреннего сгорания» высших учебных заведений утвержденным и введенным в действие постановлением Минобразования РБ 28.08.2008г. №77, и учебным планом утверждённым ректором БНТУ «9» июля 2008г., разработанным на основании Образовательного стандарта.

Целью изучения дисциплины является изучение будущими специалистами по конструированию и эксплуатации двигателей внутреннего сгорания вопросов теории моделирования, методов математического моделирования двигателей внутреннего сгорания на микро-, макро-, и метауровнях и технологии разработки моделей.

Задачами изучения дисциплины являются: знакомство с основными понятиями теории моделирования, классификацией, структурой и формой представления математических моделей, а также требованиями к ним; освоение технологии моделирования, включающей этапы определения целей и задач моделирования, описание объекта моделирования, составление содержательного описания или концептуальной модели, преобразование формального описания в математическую модель, программирование, испытание и эксплуатация модели, определение основных типовых моделей двигателей внутреннего сгорания и способов их реализации на компьютере; овладение навыками проведения вычислительных экспериментов и анализа результатов моделирования. В результате изучения дисциплины будущий специалист должен иметь представление об основных методах математического моделирования; знать к какому уровню моделирования относится разрабатываемая математическая модель и использовать соответствующий математический аппарат; владеть приёмами создания математических моделей; уметь правильно сформулировать цель разработки математической модели, её структуру, алгоритм функционирования, провести вычислительный эксперимент и оценить полученные результаты.

Дисциплина базируется на знаниях, полученных студентами при изучении общенаучных, общепрофессиональных и специальных дисциплин: «Математика», «Физика», «Информатика», «Теоретическая механика», «Термодинамика и теплопередача» и др.

В результате освоения курса «Математическое моделирование производственных процессов» студент должен:

знать:

- к какому уровню моделирования относится разрабатываемая математическая модель;
- какой математический аппарат используется при создании математической модели;
- как составить алгоритм и программу разрабатываемой модели;
- технологию разработки модели и её основные этапы;

- как оценить адекватность модели по полученным результатам;
- как упростить разработанную модель, без снижения точности полученных результатов;

уметь:

- реализовать разработанную математическую модель на алгоритмическом языке или известных компьютерных программах для решения инженерных задач;
- правильно оценить полученные результаты при моделировании;

уметь анализировать:

- процесс моделирования и своевременно вносить коррективы в него;
- результаты моделирования;

приобрести навыки:

- создания математической модели;
- реализации математической модели на компьютере.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

1.1 Перечень тем лекционных занятий и их содержание по дисциплине «Математическое моделирование производственных процессов»

Тема 1. Введение. Основные понятия моделирования.

Понятия объекта и модели. Из истории развития моделирования. Классификация моделей. Системное представление в моделировании. Моделирование в процессе проектирования технических систем.

Тема 2. Математические модели.

Понятие математической модели. Классификация математических моделей. Структура математических моделей. Форма представления математических моделей. Требования к математическим моделям. Объекты математического моделирования.

Тема 3. Технология моделирования.

Определение целей и задач моделирования. Определение объекта моделирования. Составление содержательного описания. Составление концептуальной модели. Составление формального описания. Преобразование формального описания в математическую модель.

Алгоритмизация и программирование модели. Испытание математической модели. Исследование свойств математической модели. Упрощение модели. Вычислительный эксперимент. Эксплуатация модели.

Тема 4. Типовые модели элементов ДВС. Моделирование элементов ДВС на микроуровне.

Предпосылки разработки математических моделей на микроуровне. Уравнение переноса субстанции. Уравнение энергии. Механика упругого твердого тела. Механика жидкости и газа. Моделирование теплового состояния. Численные методы решения для моделирования элементов ДВС на микроуровне. Метод сеток. Метод конечных элементов.

Тема 5. Моделирование элементов ДВС на макроуровне.

Предпосылки разработки моделей на макроуровне. Моделирования механических поступательных и вращательных систем.

Тема 6. Моделирование элементов ДВС на метауровне.

Предпосылки разработки математических моделей на метауровне. Моделирование автоматического управления системами и механизмами ДВС.

Тема 7. Статистические модели.

Корреляционный и регрессионный анализ. Разработка регрессионной модели. Планирование эксперимента. Обработка результатов эксперимента.

1.2 Конспект лекций по дисциплине «Математическое моделирование производственных процессов»

Министерство образования Республики Беларусь
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
Кафедра "Двигатели внутреннего сгорания"

КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ
по дисциплине "Математическое моделирование производственных процессов"
для студентов специальности 1- 37 01 01
"Двигатели внутреннего сгорания"

Минск 2013

Введение

Человеческая деятельность многообразна как по видам, так и по объектам, однако, во многих случаях целью деятельности является познание и преобразование окружающего мира. Познание развивается в самых различных направлениях - строение атомного ядра, законы развития космоса и человеческого общества, управление производством и многое-многое другое.

Каждое направление познания рассматривается в рамках конкретной научной дисциплины. Каждая научная дисциплина имеет свой объект исследования, свои методы исследования, свой математический аппарат. Часть научных дисциплин относятся к фундаментальным дисциплинам, так как они являются базой для развития других научных дисциплин. К фундаментальным дисциплинам относят такие науки, как физика, химия, математика и т.д.

Особую роль среди других наук играет математика, как наука, предметом изучения которой являются наиболее абстрактные - математические объекты. Может показаться, что предмет математики не так важен для практической деятельности. Однако это не так. Как показывает опыт, многие математические понятия и теории, насколько бы абстрактными они ни показались на первый взгляд, имеют самое непосредственное отношение к ежедневной практической деятельности, в том числе и инженерной деятельности. Все дело заключается в интерпретации математических абстракций, имеющих вполне конкретное реальное воплощение.

Предмет математики неоднороден. Если на "верхних этажах" "чистые" математики разрабатывают и исследуют сложные абстрактные объекты, то на "нижних этажах" разрабатываются методы описания и исследования объектов реального мира. Это направление математики получило название прикладной математики. Применение математики в инженерном деле требует помимо знания математического аппарата знания предметной области, методов разработки и реализации математического описания объектов и явлений предметной области, навыков использования средств вычислительной техники. Таким образом, дисциплина "Математическое моделирование производственных процессов", объединяя различные области знания, дает представление об общих вопросах теории моделирования, методах формализации и математического описания процессов и объектов, применении математических моделей для исследования технических объектов с использованием численных экспериментов на ЭВМ.

1.2.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ

1.2.1.1. Понятия объекта и модели

Понятия "объект моделирования", "модель", "моделирование" являются базовыми для данной дисциплины. Рассмотрим их подробно.

Начнем с некоторых примеров. Предположим, Вы проектируете автомобиль, причем Вас интересует его внешний облик. Естественно, Вы начнете с рисунка автомобиля. Этот рисунок и будет его моделью (рис. 1.1).

Пойдем дальше. Вам известно, что расход топлива на 100 км пути, наряду с другими факторами, определяется формой кузова автомобиля. Для исследования влияния формы кузова целесообразно построить макет автомобиля и исследовать его в аэродинамической трубе. Построенный макет автомобиля также будет его моделью (рис. 1.2).

Другой пример. Вы хотите определить энергетические и экономические показатели двигателя. Можно было бы установить на автомобиле специальную аппаратуру и регистрировать мощность двигателя и расход топлива в процессе эксплуатации автомобиля. Однако такой подход требует больших затрат средств и времени. Поэтому для достижения поставленной цели двигатель устанавливают на специальный стенд, позволяющий имитировать реальные нагрузки и регистрировать параметры двигателя в более удобных для исследователя условиях. Рассмотренный стенд с установленным на нем двигателем также является моделью (рис. 1.3).

Еще один пример. Предположим, Вам необходимо исследовать поле температур поршня двигателя. Можно было бы установить на поршне термопары и замерить температуры в отдельных точках поршня при работе двигателя. Однако в этом случае возникает множество проблем, связанных с передачей сигнала с совершающего возвратно- поступательное движение поршня. Как и в предыдущем случае, мы можем изготовить специальный тепловой стенд (рис. 1.4). Подвод тепла к поршню от горячих газов моделируется в этом случае источником тепла, реализованным в виде нагревательного устройства. Отвод тепла в зоне компрессионных колец моделируется устройством отвода тепла, реализованным в виде охладителя. Установленные на поршне термопары в комплекте с измерительной аппаратурой регистрируют тепловое состояние поршня, в этом случае физическая сущность явления сохранена, но исследуемый объект (поршень) перенесен в более благоприятные для исследования условия.

Описанный стенд также является моделью.

Для рассмотренной задачи можно использовать и другой подход. Как мы увидим ниже, задачу исследования поля температур в теплопроводной среде можно заменить задачей исследования поля потенциала в электропроводной среде. В нашем случае мы можем изготовить из электропроводного материала область, соответствующую сечению поршня, и, подключив соответствующим

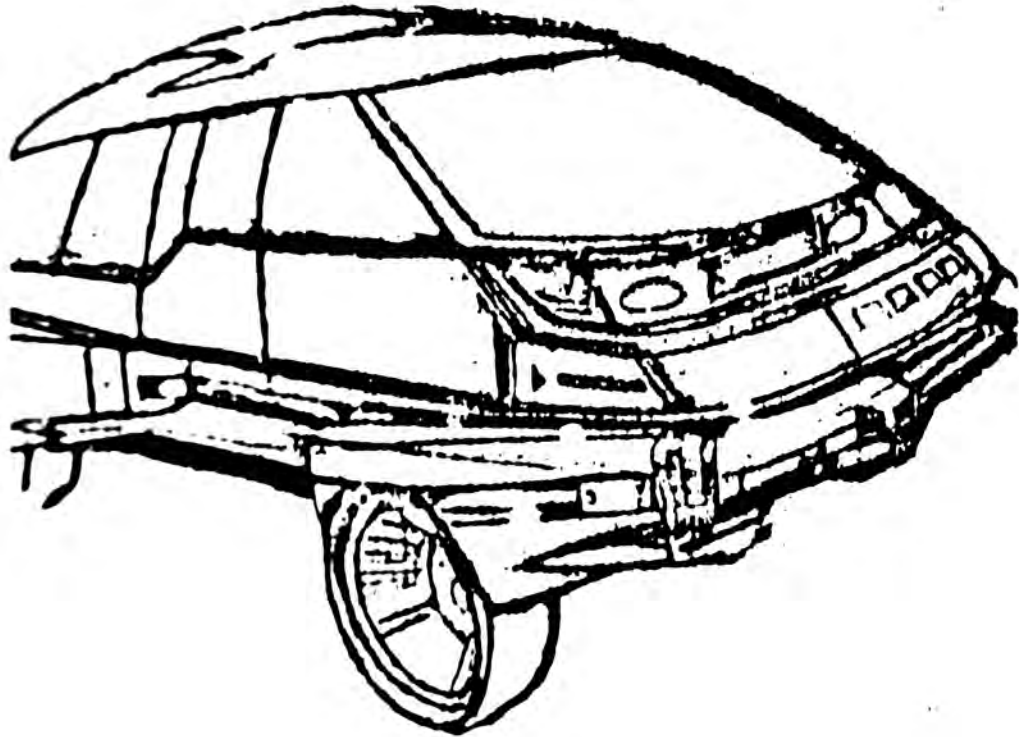


Рисунок 1.1. Модель автомобиля для проектирования его дизайна

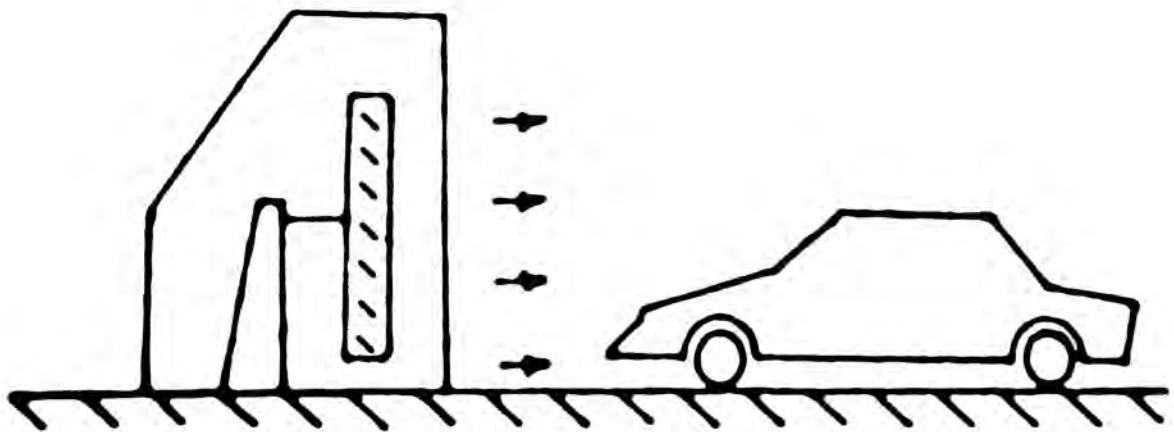


Рисунок 1.2. Модель автомобиля для исследования его аэродинамики

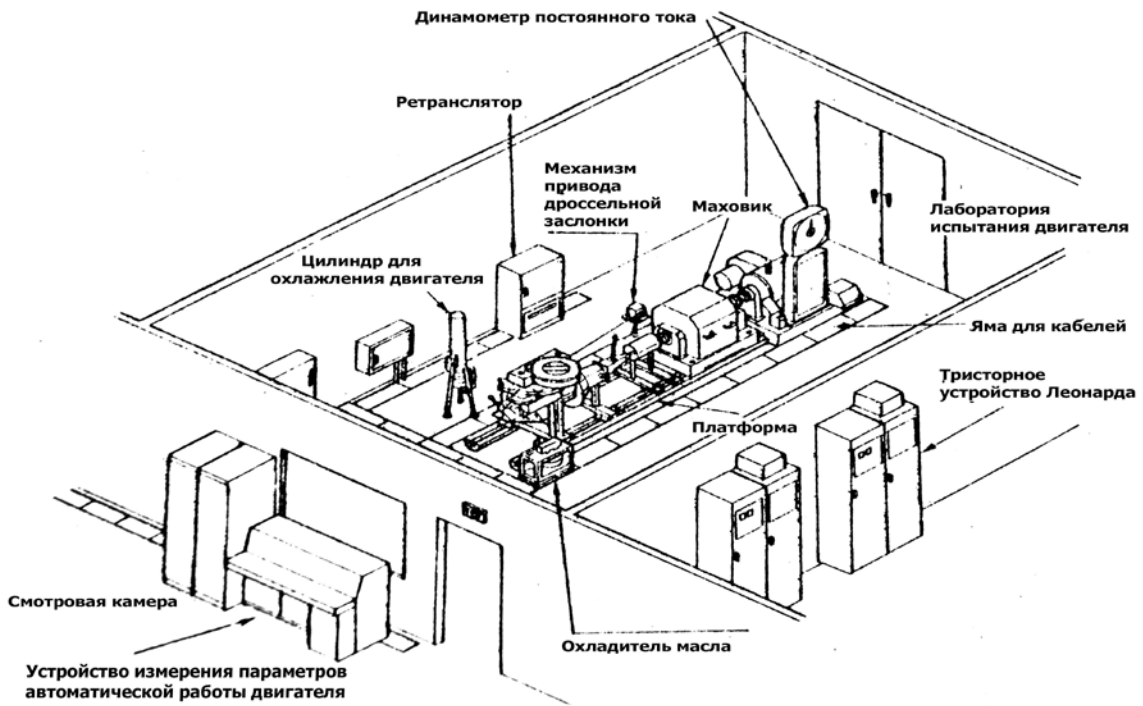


Рисунок 1.3. Стенд для испытания двигателей внутреннего сгорания

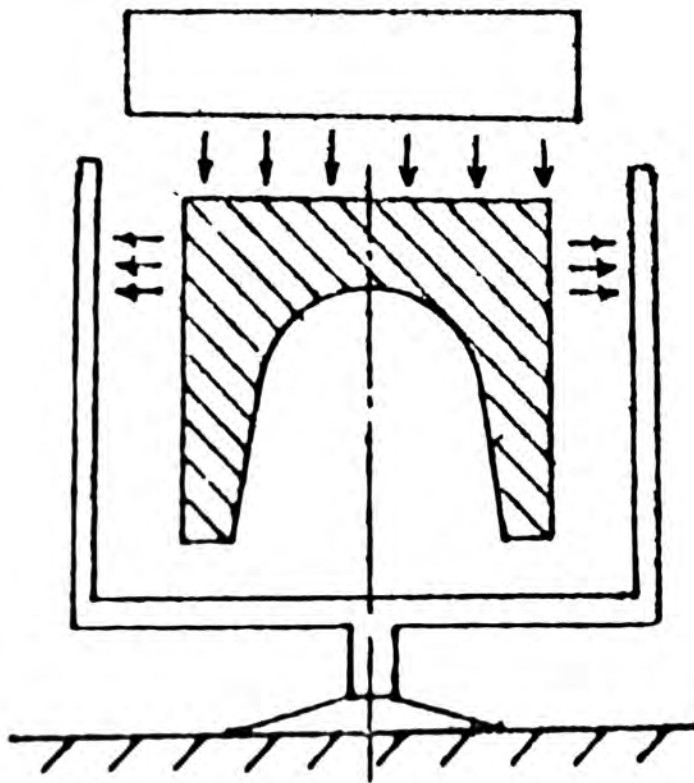


Рисунок 1.4. Физическая модель поршня для определения теплового состояния

образом рассчитанную электрическую цепь, исследовать распределение потенциалов в такой области. Полученные линии равного потенциала (изолинии) будут соответствовать линиям равной температуры (изотермам). Рассмотренная электрическая схема также будет моделью (рис. 1.5).

И последний пример. Предположим, нам необходимо получить значения перемещений, скорости и ускорения поршня двигателя. Можно было бы установить соответствующие датчики и замерить значения этих величин в процессе работы двигателя. Однако гораздо проще рассчитать искомые величины с использованием соответствующих **математических** зависимостей. Такое математическое описание кривошипно-шатунного механизма двигателя также будет его моделью (рис. 1.6).

Рассмотренные нами примеры, показывают, как мало, на первый взгляд, общего между моделями. Однако такие общие свойства моделей как их способность замещать объект моделирования и давать исследователю новые знания об объекте моделирования без использования самого объекта, позволяют сформулировать общее понятие модели.

М о д е л ь – это такой материальный или мысленно представляемый объект, который в процессе познания (изучения, моделирования) замещает объект-оригинал, сохраняя важные для данного исследования свойства объекта.

Модели реальных объектов и моделирование издавна используются в науке и технике для проверки идей, получения новых знаний, обучения. Любые два объекта, являющиеся предметом человеческой деятельности, всегда в чём-то сходны, в чем-то различны. Общие черты имеют, казалось бы, самые разные объекты. Если мы возьмем два любых объекта 01 и 02, то между ними может иметь место существенное различие и несущественное сходство в интересующих нас свойствах объектов. Может быть и наоборот. В случае, если объекты существенно схожи, то мы можем предположить что изучая один из схожих объектов, мы можем перенести результаты изучения на другой объект. Замещение объекта 01 объектом 02 для изучения объекта 01 с помощью объекта 02 называется **м о д е л и р о в а н и е м**. Замещаемый объект 01 называется оригиналом, натурой или просто объектом. Замещающий объект 02, с помощью которого проводится изучение, называется **м о д е л ь ю**. Слово модель происходит от латинского слова *modulus* - мера, величина. Дадим более четкое определение этим понятиям.

О б ь е к т моделирования — это выделенная по определенным правилам часть окружающего мира с целью его изучения.

М о д е л и р о в а н и е - метод научного познания и инженерно-технических исследований, при использовании которого исследуемый объект заменяется его моделью.

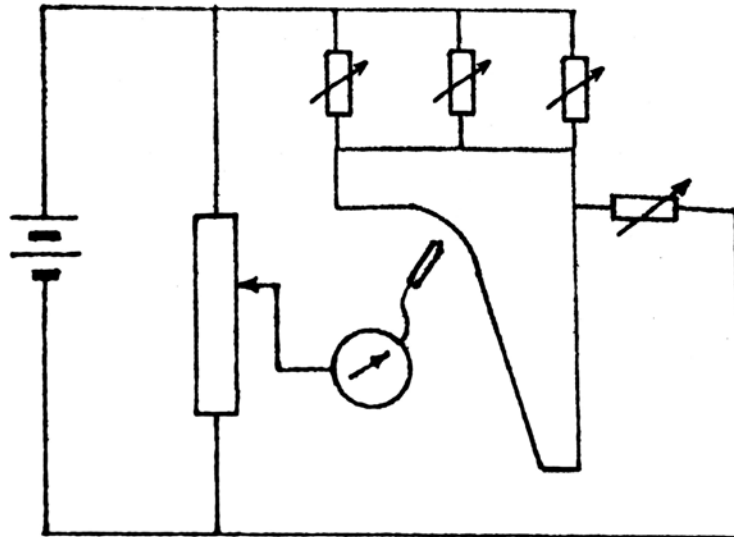


Рисунок 1.5. Аналоговая модель поршня для определения теплового состояния

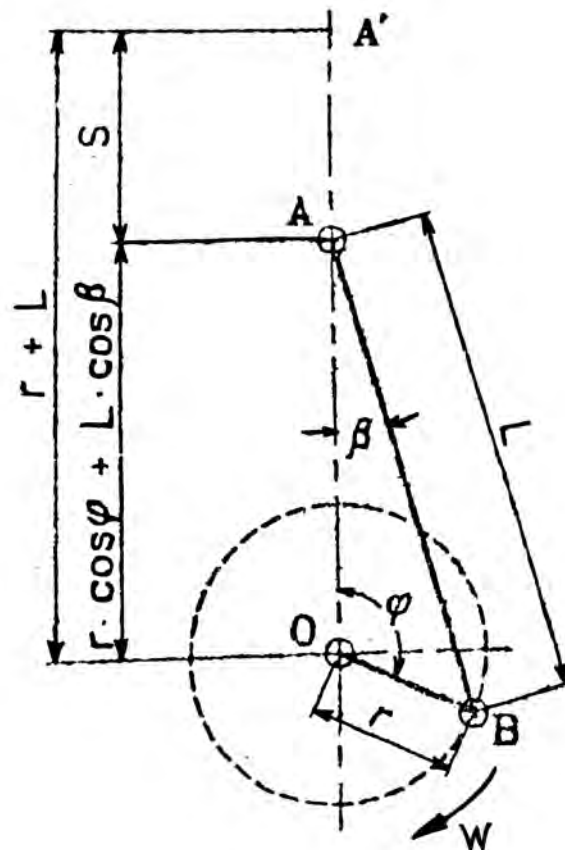


Рисунок 1.6. Модель кривошипно-шатунного механизма для исследования кинематики поршня

I.2.1.2. Из истории развития моделирования

Начальные формы моделей зародились в осмысленной деятельности человека. Условные знаковые модели возникли из необходимости общения предков человека, ведущих коллективный образ жизни. Понятие модели как заменителя одного рода материальных объектов объектами другого рода широко использовалось при создании рисунков, скульптур и т.д. Развитие понятия модели в торговле, привело вначале к идее замены одного товара другим, затем к идее некоторого эквивалента товара. Появившееся позднее понятие числа возникло в реальной форме в виде пальцев рук, камешков, зарубок, насечек. Можно предположить, что римские цифры возникли именно из такой формы представления понятия числа.

Дальнейшее развитие знаковых моделей связано с возникновением письменности и математической символики, которые мы встречаем уже в 2000 г. до н.э. в цивилизациях Египта и Вавилона. В V-III вв. до н.э. моделирование получает значительное развитие в древней Греции: создается геометрическая модель солнечной системы, геометрия Евклида, Гиппократ изучает человеческий глаз на его физической модели - глазе быка.

В дальнейшем моделирование развивалось в тесной связи с естественными науками. Начиная с механики Аристотеля и кончая тонкими абстрактными моделями Эйнштейна и Бора, человеческое сознание приобретает навыки построения и использования моделей реального мира.

Широкое развитие моделирование получило в инженерной деятельности, где особенно ценной оказалась способность модели предсказывать поведение и давать количественные характеристики объекта. Классическая механика, созданная физиками в процессе познания мира, получила дальнейшее развитие в применении к технике. Наряду с механикой материальной точки, развиваются механика твердого тела, механика жидкости и газа. При этом для описания моделей используется все более сложный математический аппарат.

Стремление упростить и облегчить вычисления привело к созданию вычислительных машин. В XVII в. появляются русские счеты в XVIII - логарифмическая линейка. В XIX и XX вв. появляются специальные математические машины, такие как планиметр, арифмометр. В 1904 г. А.Н.Крылов создает первую аналоговую машину. Если первые вычислительные устройства были чисто механическими, то с появлением электричества, появляются электромеханические, а затем и электрические вычислительные устройства. Развитие электрических вычислительных устройств, привело к созданию современных ЭВМ. С появлением ЭВМ возможности моделирования и его использование в практике инженерного проектирования намного возросли. Получили развитие известные и были созданы новые численные методы реализации моделей. В настоящее время модельрование - это прикладной исследовательский и производственный аппарат инженера, инструмент, предназначенный для получения конкретных данных и характеристик проектируемых технических систем. Таким образом, моделирование в проектировании можно определить как исследование технических систем путем построения и изучения их моделей.

1.2.1.3. Классификация моделей

Классификация позволяет систематизировать объекты, облегчает их изучение. В основу классификации должны быть положены наиболее существенные признаки объекта. Как правило, объект классифицируется по нескольким признакам, в зависимости от целей изучения. В настоящее время не существует единой общепризнанной классификации моделей, поэтому приведенную ниже классификацию следует рассматривать как один из возможных вариантов.

В зависимости от общности описания различают два уровня моделей:

- фундаментальный - включающий достаточно общие модели, нацеленные на применение в широком круге практических задач;
- прикладной - включающий частные случаи моделей первого уровня для описания конкретных устройств и процессов.

В зависимости от закона функционирования модели разделяют на абстрактные и материальные.

Абстрактные модели представляются в виде символов и функционируют по законам логики в сознании человека.

Материальные модели – это реально существующие объекты, работающие по законам природы.

Резкой границы между этими моделями нет. Можно лишь говорить об уровне абстрактности модели. В соответствии с уровнем абстрактности, модели могут быть представлены в виде пирамиды, в основании которой лежат материальные объекты, а наверху – абстрактные модели (рис. 1.7). По мере подъема на такую пирамиду уровень абстрактности модели увеличивается, а точность, полнота отражения свойств исходного материального объекта уменьшается.

Сразу над материальными объектами расположены натурные модели. В случае натурального моделирования объект не заменяется его моделью. Заменяются его связи с внешней средой и воздействие внешней среды на объект. Примером натурального моделирования является стенд для испытания двигателя (рис. 1.3). В этом случае воздействие на двигатель моделируется с помощью тормозной установки, позволяющей менять момент сопротивления на валу двигателя.

Непосредственно над натуральными моделями находятся физические модели. В этих моделях физическая сущность объекта сохранена, но сам исследуемый процесс реализуется в более удобных для проведения эксперимента



Рисунок 1.7. Классификация моделей в зависимости от уровня абстракции

условиях. Примером физической модели может служить установка для моделирования теплового состояния поршня ДВС (рис. 1.4).

Измерение температур поршня на работающем ДВС затруднено вследствие периодического движения поршня с большими скоростями и ускорениями. Если же установить источник тепла и организовать отвод тепла от поршня, то при соблюдении определённых условий, называемых условиями подобия, можно выполнить измерение температур поршня без особых затруднений.

Где-то посередине нашей пирамиды находятся аналоговые модели (рис.1.5). В случае аналоговой модели процессы одной физической природы заменяются процессами другой физической природы. Основанием для такой замены является формально-идентичное математическое описание процессов разной физической природы. Это позволяет установить зависимости между физическими величинами, входящими в описание этих процессов.

Рассмотрим проблему определения теплового состояния деталей ДВС. Выполнять такие измерения непосредственно на двигателе довольно сложно. Но если мы обратимся к математическому описанию процесса распространения тепла в теплопроводящей среде и процесса распространения электричества в электропроводящей среде, то мы увидим, что математические выраже-

ния, описывающие эти процессы, отличаются лишь физическим смыслом входящих в него величин. Рассмотрим уравнение теплопроводности для двумерной плоской области и стационарного режима. Оно имеет вид:

$$\partial^2 T / \partial x^2 + \partial^2 T / \partial y^2 = 0, \quad \text{где } T - \text{температура,} \\ x, y - \text{координаты.}$$

Аналогичное уравнение электропроводности будет иметь вид:

$$\partial^2 u / \partial x^2 + \partial^2 u / \partial y^2 = 0, \quad \text{где } u - \text{потенциал (напряжение)}$$

В силу аналогии между явлениями существует взаимно однозначное соответствие между тепловыми и электрическими величинами:

температуре соответствует напряжение;

тепловому потоку соответствует электроток;

тепловому сопротивлению соответствует электрическое сопротивление.

Таким образом, для исследования температурного поля поршня мы можем изготовить модель из электропроводного материала. Источники и стоки тепла задаются соответствующим электрическими потенциалами, замерив распределение потенциалов на модели получим поле потенциалов, являющееся аналогом его температур.

Следующим по уровню абстрактности являются модели, реализованные на цифровых ЭВМ (рис.1.6). Между ними находятся гибридные модели, включающие как аналоговые, так и цифровые элементы.

Наконец, наверху пирамиды, находятся абстрактные символичные модели, функционирующие в сознании человека.

По способу представления абстрактные модели различают:

- образные (иконические) модели, отображающие свойства оригинала с помощью наглядных чувственных образов (рисунки, макеты);
- знаковые (символьные) модели, отображающие свойства оригинала с помощью условных знаков или символов. К таким моделям относятся математические выражения, физические или химические формулы;
- образно-знаковые модели, включающие элементы моделей предыдущих видов. К ним относятся схемы, графики, чертежи.

1.2.1.4. Системные представления в моделировании.

Системный подход широко используется во всех областях инженерной деятельности, в том числе и в моделировании. ДВС, как и всякая сложная система, в этом случае описывается как иерархическая структура, состоящая из элементов и связей между ними. Под элементами понимаются составные части объекта моделирования, который, в свою очередь, рассматривается как система определённой структуры. При объединении элементов они должны образовывать объект моделирования в целом.

Система рассматривается как группа элементов, объединённых некоторой формой взаимодействия – связями (рис.1.8).

Связи между элементами определяются:

- фундаментальными законами природы;
- принимаемыми определениями и допущениями;
- используемыми полуэмпирическими и эмпирическими зависимостями.

Степень детализации рассматриваемых элементов определяется уровнем, на котором рассматривается система. На верхнем уровне система рассматривается, как состоящая из элементов: объект моделирования, внешняя среда (рис.1.9).

При моделировании технической системы на этом уровне уточняются взаимодействия «объект моделирования–внешняя среда» и определяются способы моделирования взаимодействий внешней среды на объект моделирования без детализации структуры объекта моделирования. На следующих уровнях объект моделирования рассматривается более подробно.

Двигатель внутреннего сгорания описывается как иерархическая структура (рис.1.10), элементами которой в зависимости от уровня рассмотрения могут быть:

- сам двигатель;
- механизмы и схемы двигателя;
- узлы;
- детали.

Как элемент двигатель может рассматриваться в системе «ДВС- окружающая среда», причем под окружающей средой понимается не только физическая среда, но и политика, экология, технология и т.д.

Если в качестве системы рассматривается сам двигатель, то в качестве его подсистем рассматриваются его механизмы, функциональные системы, агрегаты. На более низком уровне механизм или функциональная система рассматриваются как подсистемы, элементами которых являются детали и узлы. Структура разрабатываемой модели во многом соответствует структуре моделируемой системы, а сама модель рассматривается как иерархическая структура, элементами которой являются подмодели элементов объекта моделирования. Использование системных представлений позволяет:

- разделить общую задачу моделирования системы на ряд более простых подзадач;
- сделать обозримой общую задачу моделирования и как следствие упростить её решение;
- распределить работу между специалистами и контролировать ход её выполнения.

Основная трудность в этом случае заключается в определении соответствия разрабатываемых подмоделей общим целям моделирования, а также в согласовании работы подмоделей.

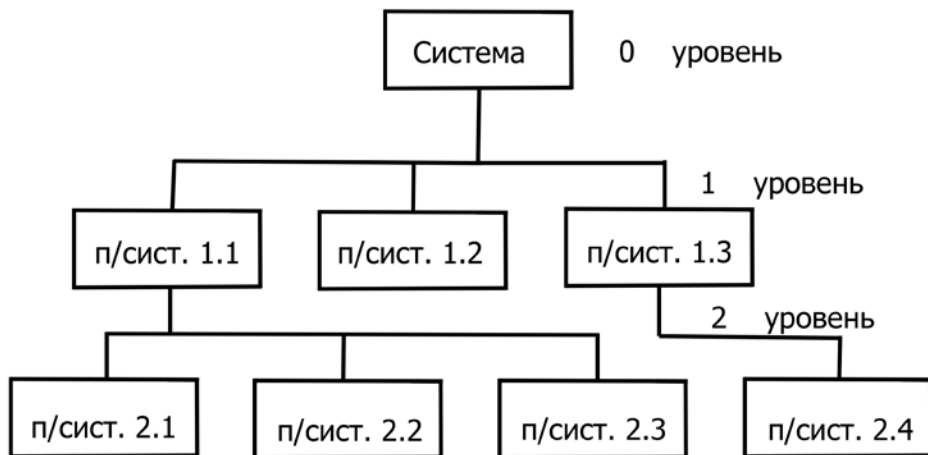


Рисунок 1.8. Представление объекта в виде системы иерархической структуры

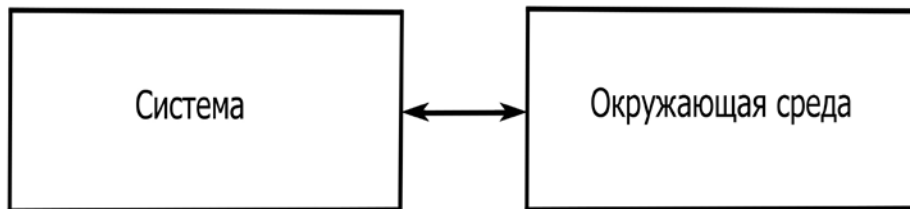


Рисунок 1.9. Представление технической системы на верхнем уровне

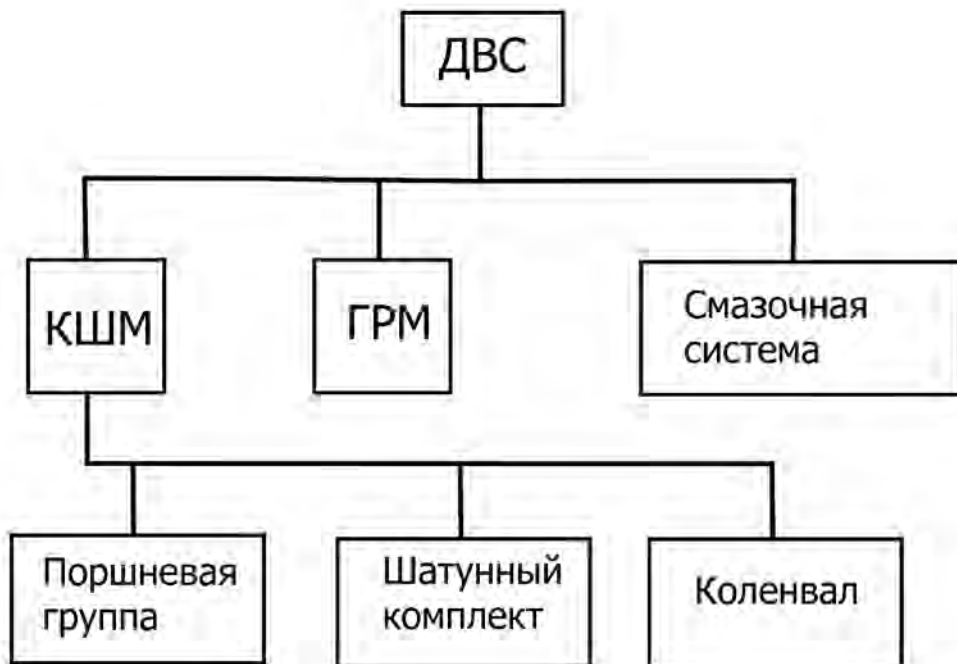


Рисунок 1.10. Представление двигателей внутреннего сгорания в виде системы

1.2.1.5. Моделирование в процессе проектирования технических систем

Процесс проектирования имеет многоаспектное описание. С точки зрения проектировщика процесс проектирования удобно рассматривать как процесс детализации описания разрабатываемой технической системы. При этом описание - это не что иное, как модель технической системы. Таким образом, процесс проектирования - это информационный процесс разработки модели технической системы, конечное описание которой позволяет изготовить, техническую систему в натуре.

Модель технической системы на любом этапе проектирования включает в качестве компонентов:

- модель, описывающую цели функционирования технической системы;
- модель, описывающую среду функционирования технической системы;
- модель, описывающую алгоритм функционирования технической системы;
- модель, описывающую разрабатываемую техническую систему.

На начальных этапах проектирования наиболее полным является описание целей разрабатываемой технической системы, а описание самой технической системы известно лишь в самых общих чертах. Процесс проектирования заключается в итерационном поэтапном преобразовании первичного описания технической системы в описание, необходимое и достаточное для производства и эксплуатации технической системы. Работа инженера - это работа с моделями технической системы и моделями ее элементов, а моделирование - это инструмент, предназначенный для изучения свойств, которыми будет обладать проектируемая система, на ее моделях. До внедрения ЭВМ в инженерную практику применение моделирования сдерживалось сложностью и громоздкостью вычисления, которые невозможно было выполнить в отведенное для проектирования время. Поэтому большинство проектов выполнялось, опираясь на опыт разработчиков и результаты экспериментальных исследований физических объектов. ЭВМ позволяют заменить физические модели математическими и получить количественную информацию о технической системе посредством выполнения эксперимента на машине. В этом случае существенно сокращаются сроки разработки проекта, снижаются затраты и повышается качество проекта и разрабатываемой технической системы.

1.2.2 МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ

1.2.2.1 Понятие математической модели

Ввиду отсутствия общепризнанного определения понятия “Математическая модель”, дадим несколько определений.

Математическая модель – это совокупность математических объектов (чисел, переменных, векторов и т.д.) и отношений между ними, которые адекватно отображает определенные свойства объекта моделирования.

Математическая модель – это математически формализованное представление знаний об объекте (математическое описание), снабженное алгоритмом решения и реализованное в виде программы.

Математическое моделирование – это процесс создания математической модели и оперирование ею с целью получения сведений об объекте моделирования.

Объект моделирования описывается вектором выходных параметров $Y=(y_1, y_2, \dots, y_i)$, вектором внутренних параметров $X=(x_1, x_2, \dots, x_i)$, и вектором входных параметров, описывающим состояние внешней среды $U=(u_1, u_2, \dots, u_i)$. Зависимость выходных параметров от внутренних и параметров окружающей среды, если она может быть выражена в явном виде, называется математической моделью объекта моделирования: $Y=f(X, U)$. На практике не всегда удается построить указанную зависимость. Обычно в описании математической модели помимо параметров входят величины, характеризующие состояние объекта моделирования. Например, для механических систем – это скорости, ускорения, для гидравлических систем – это давление, плотности и т.д. Переменные, характеризующие состояние объекта моделирования, называются фазовыми. Пространство фазовых переменных называется фазовым пространством. Для однозначного описания объекта моделирования достаточно использовать лишь некоторую часть фазовых переменных, называемых базовыми, как так остальные могут быть выведены через базовые переменные.

1.2.2.2. Классификация математических моделей

Типы математических моделей в зависимости от признака классификации представлены в табл.2.1.

Таблица 2.1.

№ пп	Признак классификации	Типы моделей
01	Зависимость между входным и выходным параметрами	Детерминированные Стохастические
02	Наличие параметра «время»	Стационарные Нестационарные
03	Зависимость параметров модели от пространства и времени	Линейные Нелинейные
04	Количество учитываемых пространственных координат	Нульмерные Одномерные Двухмерные Трёхмерные
05	По характеру отображаемых свойств	Структурные: Топологические Геометрические Функциональные: Аналитические Алгоритмические Имитационные

Детерминированная математическая модель – это модель, дающая результаты, однозначно соответствующие исходным данным, т.е. одному и тому же набору исходных данных будут всегда соответствовать одни и те же результаты. В стохастических моделях связь между входными и выходными данными неоднозначна и одним и тем же исходным данным соответствует набор выходных данных описываемых некоторым законом распределения. Все реальные объекты имеют стохастический характер, поэтому выбор детерминированной или стохастической модели определяется целями исследования.

Детерминированные и стохастические модели могут быть:

- стационарными или нестационарными;
- линейными или нелинейными;
- непрерывными или дискретными;
- структурными или функциональными.

В стационарных моделях структура математической модели и характер ее взаимодействия с внешней средой не зависит от времени. Практически все реальные объекты имеют нестационарный характер в случаях, когда изменение исследуемых параметров с течением времени незначительно или когда не предусматривается их учитывать целями моделирования, то используют стационарную модель. Для описания стационарных моделей обычно достаточно алгебраического аппарата, т.к. модель в этом случае описывается системой линейных или нелинейных равенств, неравенств и простейших логических отно-

шений. Динамические модели, как правило, описываются дифференциальными уравнениями, разностными уравнениями.

Линейная математическая модель содержит линейные зависимости. Такие модели обладают свойствами однородности и аддитивности (слагаемости), что значительно облегчает как процесс их разработки, так и их использование.

Непрерывные математические модели содержат параметры, которые можно изменять непрерывно в заданных пределах. Параметры дискретных математических моделей меняются дискретно. Часто они принимают только два значения: 0 и 1.

Нульмерные модели не содержат пространственных координат. Единственной изменяемой координатой является время. Одномерные, двумерные и трехмерные модели содержат одну, две или три пространственные координаты соответственно.

Структурные математические модели предназначены для отображения структурных свойств объекта. Структурные математические модели различают топологические и геометрические. Топологические математические модели отражают состав (элементы) и связи объекта. Топологические модели реализуются в виде графов, таблиц, матриц, списков, схем и т.д. Геометрические модели отражают геометрические свойства элементов и объектов моделирования, а также информацию о взаимном расположении элементов. Реализуются эти модели в виде уравнений линий и поверхностей, алгебраических и логических соотношений, описывающих элементы тела, графами, списками, отображающими сложные конструкции из типовых конструктивных элементов.

Функциональные математические модели предназначены для отображения физических, химических и других процессов, протекающих в объекте при его функционировании. Обычно функциональные математические модели представляют собой системы уравнений, связывающие между собой входные и выходные параметры математической модели.

По способу представления свойств объекта функциональные модели делятся на аналитические и алгоритмические. Аналитические математические модели представляют собой явные выражения выходных параметров как функций входных и внутренних параметров объекта моделирования. Такие модели имеют вид $Y=f(X,U)$, где $Y=(y_1, y_2, \dots, y_n)$ - вектор выходных параметров, $X=(x_1, x_2, \dots, x_i)$ - вектор внутренних параметров, а $U=(u_1, u_2, \dots, u_j)$ - вектор входных параметров. Аналитические математические модели характеризуются высокой экономичностью, однако, как правило, создание их возможно только при наличии существенных ограничений и допущений, снижающих точность моделирования.

Алгоритмические математические модели реализуют связи между указанными выше параметрами в виде алгоритма. В этом случае многие ограничения могут быть сняты и точность моделирования существенно повышена. В некоторых случаях явления в объекте моделирования настолько сложны и многообразны, что и алгоритмическая математическая модель становится грубой, поэтому исследователь применяет имитационное моделирование. В имитационной модели поведение объекта моделирования описывается набором алгорит-

мов, которые моделируют ситуации, возникающие в объекте. Моделирующий алгоритм, в этом случае, позволяет по исходным данным, содержащим сведения об исходном состоянии объекта моделирования и фактическим значениям параметров объекта моделирования, отобразить реальные явления в объекте моделирования и получить сведения о возможном поведении объекта моделирования в конкретной ситуации.

1.2.2.3. Структура математических моделей.

Формально математическая модель может рассматриваться как комбинация таких элементов:

- компоненты;
- параметры;
- переменные;
- функциональные зависимости;
- ограничения;
- целевые функции.

Под компонентами понимаются элементы математической модели, описывающие отдельные элементы объекта моделирования. Чем больше структура модели соответствует структуре объекта моделирования, тем больше компонентов и тем более универсальной является математическая модель.

Параметры модели - это постоянные величины или заранее заданные функции времени, изменение которых допускается только между решениями задачи. В качестве параметров используют величины, характеризующие некоторые свойства объекта моделирования или его функционирование. (Примером может служить техническая характеристика объекта).

Переменные математической модели - величины, подлежащие изменению и определению в процессе моделирования. В отличие от параметров переменные могут принимать только значения, определяемые видом функции. Различают входные, выходные переменные и переменные состояния объекта моделирования.

Входные переменные математической модели - величины, целенаправленно изменяемые в соответствии с моделирующим алгоритмом при решении задачи проектирования с использованием математической модели.

Выходные переменные математической модели - величины подлежащие определению при решении задачи проектирования с использованием математической модели.

Переменные состояния объекта моделирования - величины, характеризующие состояние объекта моделирования в процессе моделирования.

Функциональные зависимости описывают изменение переменных в пределах компонента, между компонентами, между объектом моделирования и внешней средой.

Ограничения представляют собой задаваемые пределы изменения значений переменных. Они могут вводиться либо разработчиком, либо определяться объектом моделирования в силу присущих ему свойств.

Под функцией понимается произвольный закон, устанавливающий соответствие между зависимой и независимой величинами. При разработке моделей используются следующие функции:

- аналитические;
- кусочно-аналитические;
- простые обобщенные функции.

Целевая функция - это точное отображение целей и задач объекта моделирования и правил оценки их выполнения.

Математическая модель или ее элемент могут быть:

- геометрическим образом;
- функцией;
- вектором;
- матрицей;
- скалярной величиной;
- конкретным числом.

При разработке математической модели удобно представлять параметры и переменные модели в виде, показанном в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Обозначение	Идентификатор	Размерность	Определение	Пределы min max	Компонент	Источник информации
ρ	ρ	МПа	Давление	0.8 15	1	[2]

1.2.2.4. Формы представления математических моделей.

Основные формы представления математических моделей следующие:

Инвариантная форма - запись соотношений модели с помощью традиционного математического языка не связанного с методом решения задачи.

Алгоритмическая форма - запись соотношений модели и выбранного численного метода решения в форме алгоритма.

Аналитическая форма - запись модели в виде результатов аналитического решения исходных уравнений модели. В аналитической форме модель представляет собой явные выражения выходных параметров как функции внутренних и входных параметров.

Графическая (схемная) форма представления модели на некотором графическом языке. Примерами таких моделей могут быть схемы, графы, диаграммы и т.д. Графическое представление информации удобно для восприятия человеком, однако использование таких форм возможно только при наличии правил однозначного толкования элементов графических моделей.

1.2.2.5. Требования к математическим моделям.

Основные требования к математической модели - адекватность, универсальность, экономичность.

Математическая модель считается адекватной, если отражает заданные свойства моделируемого объекта с заданной точностью в заданной области моделирования. Таким образом, под адекватностью понимается:

- правильное качественное описание объекта моделирования по выбранным характеристикам;
- правильное количественное описание явления с некоторой разумной степенью точности.

Способы проверки адекватности:

- контроль на частных примерах;
- аналогии;
- проверка следствий.

Точность математической модели определяется как степень совпадения выходных параметров объекта моделирования и математической модели. Количественно точность математической модели оценивается различными нормами вектора погрешностей выходных параметров. Если обозначить через ε_i относительную погрешность по i -му выходному параметру:

$$\varepsilon_i = (Y_{mi} - Y_{oi}) / Y_{oi} ,$$

где Y_{oi} - i -й выходной параметр, имеющий место в объекте моделирования;

Y_{mi} - i -й выходной параметр, полученный при моделировании.

Выбор нормы вектора в известной степени произволен. Часто используются следующие нормы:

$$\varepsilon = \text{MAX}_{i=1, n} |\varepsilon_i| ; \quad \varepsilon = \sqrt{\sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2}$$

Точность моделирования определяется также областью моделирования. Если предварительно задаться предельно допустимой погрешностью моделирования, то можно выделить область моделирования, в которой будут выполняться условия адекватности. Эту область называют областью адекватности модели. Область адекватности может быть определена и другими способами. Например, могут быть заданы предельные значения погрешностей по каждому выходному параметру. Область адекватности в этом случае определяется как область моделирования, в которой выполняются условия $\varepsilon_i \leq \varepsilon_{id}$ (допустимая погрешность по i -ому параметру) для каждого выходного параметра. В связи с большими затратами, необходимыми для определения области адекватности, для сложных моделей она, как правило, не определяется.

Под универсальностью модели понимается множество реальных объектов и их взаимодействий с внешней средой, которое описывает данная модель при заданной степени адекватности. Универсальность математической модели определяется числом и составом учитываемых в модели параметров, ее струк-

турой. Введение новых параметров расширяет применимость модели, так как увеличивается количество получаемой информации. Выбор совокупности параметров, в некоторой степени, произволен, но для большинства технических систем число и перечень учитываемых свойств и соответствующих им параметров определены и типизированы.

Экономичность математической модели определяется ресурсами ЭВМ, необходимыми для ее реализации. Под ресурсами, в первую очередь, понимают необходимую для реализации математической модели на ЭВМ память и время счета. Эти параметры взаимосвязаны, поэтому увеличение скорости счета, как правило, реализуется за счет увеличения необходимой оперативной памяти ЭВМ и наоборот. Экономичность математической модели также определяется выбранным для реализации математической модели методом решения, алгоритмом и особенностями реализации программы на ЭВМ.

Требования универсальности, экономичности и адекватности противоречивы и разумное удовлетворение этих требований при разработке математической модели возможно на компромиссной основе.

1.2.2.6. Объекты математического моделирования.

В зависимости от уровня проектирования объектами моделирования могут выступать различные элементы технической системы.

Моделирование на верхнем уровне называется *внешним*. В этом случае техническая система сама является объектом моделирования.

Моделирование технической системы на некотором уровне, отличном от внешнего, называется *внутренним* моделированием. Помимо внутреннего и внешнего моделирования, различают моделирования на *микромасштабах* и *метаскалах*.

Математическая модель элементов технической системы на микроуровне отражает физические процессы, протекающие в сплошных средах и непрерывном времени. Независимыми переменными таких моделей выступают пространственные координаты и время. Зависимыми переменными выступают фазовые переменные, также как температуры, деформации, давления, скорости потоков и т.д. При разработке математической модели данного уровня применяется аппарат математической физики. При этом поля фазовых переменных описываются интегральными, интегро-дифференциальными и дифференциальными уравнениями в частных производных. Как правило, сами по себе уравнения математической физики не представляют собой законченной математической модели. Для получения замкнутой системы уравнений уравнения математической физики необходимо дополнить уравнениями, отражающими взаимодействие исследуемого объекта с окружающей средой. Совокупность таких уравнений называется краевыми условиями. Краевые условия отражают значения фазовых переменных на границах рассматриваемых пространственных и временных областей. Получение конечного решения такой системы уравнений

в виде функции возможно лишь для тел простой формы и простых видов взаимодействия с внешней средой. Для исследования реальных конструкций необходимо использовать численные методы, в основе которых лежат две процедуры:

- дискретизация пространственно-временной области;
- алгебраизация математического описания.

Под дискретизацией понимается разделение рассматриваемых пространственных и временных областей на конечное число подобластей и представление поля исследуемой фазовой переменной конечным числом значений фазовой переменной в условных точках подобластей.

Под алгебраизацией понимается замена математического описания в виде дифференциальных и интегральных уравнений математическим описанием в виде системы алгебраических уравнений. В настоящее время используется три подхода к дискретизации и алгебраизации математического описания, получивших названия:

- Метод конечных разностей;
- Метод конечных элементов;
- Метод граничных элементов.

Математическая модель на макроуровне описывает техническую систему на уровне отдельных элементов, узлов, механизмов, которые рассматриваются как неделимые единицы. Математическую модель технической системы на данном уровне получают объединением компонентных уравнений, описывающих функционирование элементов технической системы, и типологических уравнений, описывающих связи между элементами технической системы.

Компонентные уравнения - это уравнения, описывающие элементы технической системы, рассматриваемой на макроуровне. Компонентные уравнения составляются на основе знаний из конкретной предметной области, которые получены экспериментальным или теоретическим путём. С точки зрения математики компонентные уравнения могут быть линейными, нелинейными, алгебраическими, обыкновенными дифференциальными, интегральными.

Топологические уравнения - уравнения, отражающие способ связи элементов между собой. Топологические уравнения могут выражать законы сохранения массы, энергии, импульса и т.п.

Как правило, техническая система включает несколько разнородных по физическому принципу действия подсистем, поэтому для получения математической модели технической системы необходимо:

- выделить в технической системе однородные подсистемы, например механическую, гидравлическую, термодинамическую, и т.д;

- в рамках каждой подсистемы выделить типовые элементы и построить математические модели данных элементов;

- установить связи между элементами подсистем и самими подсистемами; получить математическую модель технической системы.

Предпосылкой создания единого математического и программного обеспечения для моделирования объектов на макроуровне являются аналогии компонентных и топологических уравнений однородных физических систем, из которых состоит объект моделирования.

Математическая модель на метауровне рассматривает объект моделирования в целом. При этом моделируются алгоритмы функционирования технической системы и её связи с окружающей средой. Характерной задачей моделирования на данном уровне, является задача моделирования управления и регулирования технической системы. Для создания таких моделей используется хорошо разработанный аппарат теории автоматического управления. При разработке ДВС с задачами такого типа конструктор имеет дело при проектировании систем управления и регулирования ДВС. В этом случае модель состоит из трёх компонентов: двигатель, система управления, окружающая среда. Задавая различные воздействия на ДВС со стороны окружающей среды, конструктор изучает реакцию системы «ДВС - система управления».

1.2.3. ТЕХНОЛОГИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Процесс разработки модели на сегодняшний день скорее может быть определён не как наука, а как искусство, во многом базирующееся на опыте разработчика. Любой набор правил для разработки моделей имеет ограниченную полезность и может рассматриваться в качестве некоторого каркаса деятельности, направленной на разработку модели. Когда в своей практической деятельности инженер приступает к разработке модели, то, как правило, его охватывает разочарование. Так как ни солидные знания в области математики, ни знание предметной области моделирования, не гарантируют успеха. Единственным путём приобретения навыков моделирования является сама практика моделирования. Таким образом, не существует твёрдых и эффективных правил, последовательное применение которых приведёт к созданию модели, тем не менее, используя предыдущий опыт моделирования, можно выделить отдельные этапы построения математической модели и рассмотреть их содержание.

Как правило, под математическим моделированием понимается два процесса:

- процесс разработки и реализации модели;
- проведение с использованием разработанной модели машинного эксперимента, с целью получения ответов на стоящую перед исследователем задачу.

Исходя из данного понимания процесса математического моделирования, можно выделить следующие этапы (рис.3.1):

- определение целей и задач моделирования;
- определение объекта моделирования;
- составление содержательного описания объекта моделирования;
- разработка концептуальной модели;
- составление формального описания объекта моделирования;
- преобразование формального описания в математическую модель;
- алгоритмизация и программная реализация модели на ЭВМ;
- испытания модели;
- эксплуатация модели.

1.2.3.1. Определение целей и задач моделирования.

А. Эйнштейн как-то сказал, что правильная постановка задачи даже более важна, чем её решение. Для того, чтобы найти приемлемое решение задачи, необходимо знать, в чём она состоит. Это положение часто игнорируется и данному этапу уделяется незаслуженно мало внимания. Как результат – чрезмерные затраты ресурсов на последующих этапах моделирования.

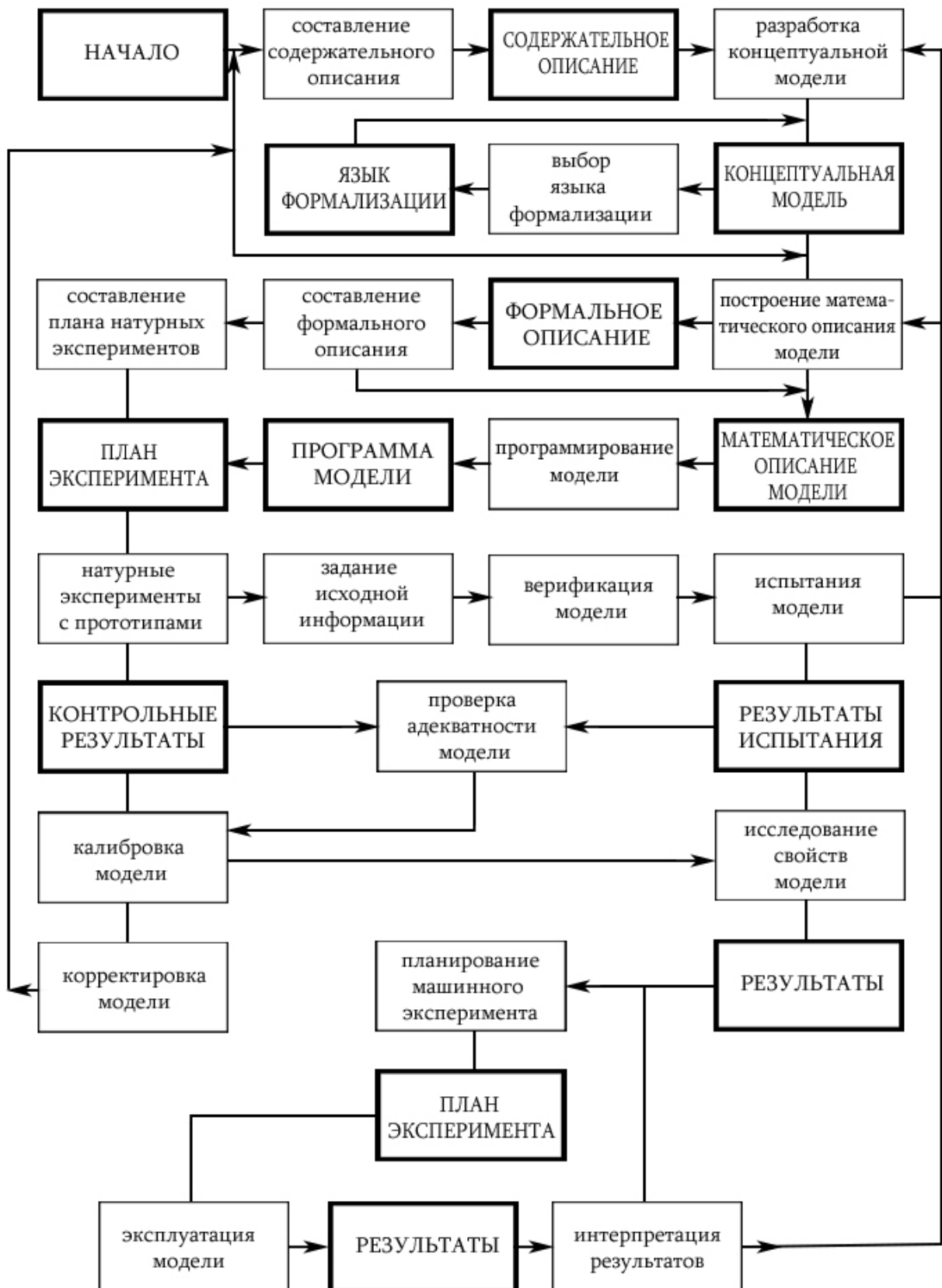


Рисунок 3.1. Схема процесса разработки математической модели

На данном этапе разработчик должен поставить перед собой следующие вопросы:

- для каких целей разрабатывается модель?
- где и как модель будет использоваться?
- кем она будет использоваться (уровень знаний, квалификация пользователя)?
- на какие вопросы модель должна давать ответы?

Полные ответы на данные вопросы позволяют в дальнейшем избежать дополнительных затрат на разработку.

1.2.3.2. Определение объекта моделирования

Этот этап предполагает определение: 1) целей функционирования объекта моделирования; 2) границ между объектом и внешней средой.

Определение целей функционирования позволяет выделить множество объектов, потенциально способных удовлетворить поставленные цели. Как правило, задача моделирования первоначально определяется для конкретного объекта (конкретной модели ДВС, конкретной конструкции КШМ и т.д.). Но решать задачу в такой узкой постановке нерационально, так как в дальнейшем модель не сможет использоваться для решения близких задач из-за неоправданно наложенных ограничений.

При определении границ необходимо однозначно ответить на вопрос, что относится к объекту моделирования, а что относится к окружающей среде. Учитывая многообразие и взаимосвязь объектов и явлений реального мира, разработчик должен необходимый набор элементов и взаимосвязей, подлежащих моделированию. Пока такой набор не будет выделен, разработчик будет иметь дело с бесконечным числом, связей и их сочетаний.

1.2.3.3. Составление содержательного описания

Не надо изучать всё, что связано с поставленной проблемой, а по возможности наиболее экономичным путём идти к цели. Построение модели – это поиск и исследование характеристик, которые дают наиболее лаконичное описание наиболее важных свойств объекта. Данный этап включает операции:

- неформальное обсуждение физической картины изучаемого явления;
- выдвижение гипотез и моделей;
- прикидка влияния различных факторов;
- выбор законов, гипотез, полагаемых в основу модели;
- выбор параметров, используемых для описания явлений данного класса;
- выбор системы уравнений, связывающей параметры.

Из всей информации об объекте моделирования выбираются данные, непосредственно относящиеся к цели моделирования. Содержательное описание включает:

описание объекта моделирования;

описание внешней среды, взаимодействующей с объектом моделирования;

описание алгоритма функционирования объекта моделирования;

описание взаимодействия объекта моделирования с внешней средой.

1.2.3.4. Разработка концептуальной модели

Для достаточно простых моделей этапы разработки содержательного и концептуального описаний во многом совпадают. Для более сложных моделей на данном этапе выполняется следующие действия:

уточняется общий замысел разработки;

общая задача моделирования разбивается на подзадачи и устанавливается приоритет их решений;

выполняется декомпозиция объекта моделирования в соответствии с целями моделирования и структурой объекта моделирования;

описываются компоненты, переменные, параметры, функциональные зависимости, целевые функции, ограничения.

1.2.3.5. Составление формального описания.

Решение задачи проектирования математическими методами предполагает наличие:

физической гипотезы;

математической модели;

гипотезы исследования математической модели;

выбор вычислительного метода;

реализацию вычислений на ЭВМ.

На этом этапе объект моделирования описывается в терминах конкретной области знаний (теоретическая механика, термодинамика, механика жидкости и газа, и т.д.). При этом следует получить ответы на следующие вопросы:

какие области знаний используются для описания объекта моделирования;

какие законы, постулаты, понятия этих областей знаний используются;

каков характер используемых законов (теоретические или экспериментальные);

какие параметры будут использованы в описании;

пределы изменения переменных, критические значения, источники получения точности;

наличие связей между параметрами.

1.2.3.6. Преобразование формального описания в математическую модель

При разработке математической модели инженер может использовать два подхода. Первый подход, называемый формальным, основан на преобразовании математических зависимостей, описывающих интересные явления в

общем виде, к виду, соответствующему конкретной проблеме. Рассмотрим формальный подход на следующем примере. Предположим, необходимо исследовать распределение температур в некоторой одномерной конструкции на стационарном режиме при отсутствии внутренних источников тепла. В общем виде распространение тепла в твёрдом теле описывается уравнением Фурье:

$$c \rho (\partial T / \partial \tau) = \alpha c \rho \Delta T + q_v$$

$\alpha c \rho = \lambda$ – приведенный коэффициент теплопроводности.

Так как наша задача стационарная и внутренние источники тепла отсутствуют, то можно написать:

$$\partial T / \partial \tau = 0 \quad \text{- стационарная теплопроводность;}$$

$$q_v = 0 \quad \text{- отсутствие внутреннего источника тепла}$$

$$\text{Отсюда} \quad \lambda \Delta T = 0,$$

где Δ – дифференциальный оператор Лапласа

$$\Delta = \partial^2 / \partial x^2 + \partial^2 / \partial y^2 + \partial^2 / \partial z^2$$

Таким образом, выражение преобразуется к виду:

$$\lambda_x (\partial^2 T / \partial x^2) + \lambda_y (\partial^2 T / \partial y^2) + \lambda_z (\partial^2 T / \partial z^2) = 0.$$

Учитывая, что мы имеем дело с одномерным объектом, можно записать:

$$\lambda_x (\partial^2 T / \partial x^2) = 0.$$

Окончательно получим, что для нашей задачи математическое описание распространения тепла в одномерной конструкции при отсутствии внутренних источников и $\lambda_x = \text{const}$ будет иметь вид:

$$\partial^2 T / \partial x^2 = 0.$$

Однако используемое нами уравнение Фурье было получено ранее, на основании более общего подхода – закона сохранения энергии. Используя второй подход, можно получить математическую модель не на основе преобразования общего математического описания к конкретной задаче, а используя фундаментальные физические законы, в первую очередь законы сохранения. Получение математического описания на основе использования фундаментальных физических законов называется концептуальным подходом. Рассмотрим использование концептуального подхода на примере описанной задачи. Для этого выделим в нашей конструкции малый элемент длиной dx

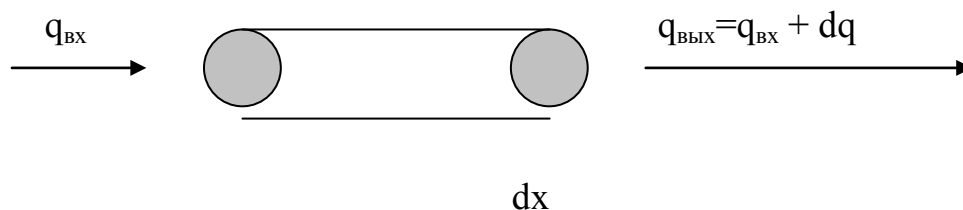


Рисунок 3.2. Малый элемент одномерной конструкции

Присвоим концевым точкам номера 1 и 2, а тепловые потоки на входе и выходе из элемента обозначим как $q_{\text{вх}}$ и $q_{\text{вых}}$, соответственно. Согласно закону сохранения энергии для тепловых потоков можно записать

$$q_{\text{вх}} = q_{\text{вых}} - dq.$$

Из физики нам известна гипотеза Фурье, согласно которой можно тепловой поток q , коэффициент теплопроводности материала тела и градиент температуры связать соотношением:

$$q = -\lambda(\partial T/\partial x).$$

Для нашей задачи мы можем записать:

$$q_{\text{вх}} = -\lambda(\partial T/\partial x); \quad q_{\text{вых}} = -\lambda(\partial T/\partial x)$$

$$dq = (\partial/\partial x)(-\lambda(\partial T/\partial x))dx.$$

Подставив эти зависимости в выражение, полученное на основе закона сохранения, при условии $\lambda = \text{const}$, мы получим:

$$\partial^2 T/\partial x^2 = 0.$$

Как видим, оба подхода приводят к одинаковым математическим моделям, но концептуальный подход является наиболее общим и его можно использовать, если обобщенное математическое описание задачи неизвестно.

1.2.3.7. Алгоритмизация и программирование модели

Программа моделирования разрабатывается и эксплуатируется в несколько этапов, называемых «жизненным циклом» программы. В табл. 3.1 приводятся этапы разработки и затраты на каждом этапе.

Таблица 3.1.

пп	Наименование этапа	Трудозатра- ты по эта- пам 1-6	Трудоза- траты по этапам 1-7
1	Формирование требований, предъявляемых к программе	10	3
2	Разработка внешних спецификаций (определение входов, выходов и их связи)	10	3
3	Проектирование структуры программы (программа= алгоритм + структуры данных)	15	5
4	Разработка программной документации	10	3
5	Кодирование (запись на выбранном языке программирования)	15	5
6	Тестирование и отладка	40	5
7	Сопровождение программы	0	68

К программам моделирования предъявляются жёсткие и, как правило, противоречивые требования. К наиболее общим требованиям относятся:

надёжность, т.е. гарантия получения результатов при допустимых значениях исходных данных;

возможность модификации, т.е. дальнейшего развития и необходимого изменения программ;

качество программы;

гарантированная точность вычислений;

удобный диалог с пользователем;

надёжная диагностика данных, вводимых пользователем;

полнота программной документации;

соответствие программы, ресурсам используемой ЭВМ;

мобильность программного обеспечения;

чёткость структуры, ясность текста, наличие комментариев, хорошая читаемость программы.

1.2.3.8. Отладка математической модели.

После реализации математической модели на ЭВМ разработчик должен выполнить ещё ряд этапов: испытание математической модели, исследование свойств математической модели, упрощение модели и вычислительный эксперимент.

1.2.3.8.1. Испытание математической модели.

Процедура испытания математической модели включает этапы:

- задание исходной информации для моделирования;
- верификация исходной модели;
- проверка адекватности модели;
- калибровка модели.

Процедура задания исходной информации зависит от типа модели. Как правило, инженер имеет дело с функциональной моделью. В этом случае, объект моделирования рассматривается как система, на которую воздействуют переменные U . Они могут быть измерены, но ими нельзя управлять. Помимо переменных U на систему воздействуют параметры X , которые исследователь может изменять. На выходе системы имеется некоторое множество характеристик Y , интересующих разработчика. Модель в этом случае можно рассматривать как совокупность компонентов, реализующих известную разработчику функцию $Y=f(X,U)$.

Следует различать модели существующих и проектируемых систем. Если объект моделирования существует, разработчик имеет возможность провести необходимые испытания и получить необходимую информацию. При моделировании проектируемых систем, а также в тех случаях, когда нельзя организовать проведение экспериментов, для получения необходимой информации используют результаты испытаний прототипов систем, а если таких прототипов не существует, то используются экспертные оценки значений X , U , Y .

Верификация математической модели заключается в доказательстве соответствия алгоритма функционирования замыслу модели путём использования неформальных и формальных процедур. Неформальные процедуры имеют целью убедить заказчика и разработчика в соответствии математической модели задачам разработки. Как правило, разработчик убеждается в правильности функционирования модели в процессе её комплексной отладки. Заказчик, имеющий дело с готовой модели, разрабатывает собственные тесты, убеждающие его в правильности функционирования математической модели. Формальные процедуры проверки предполагают использование специальных пре- и постпроцессоров, анализирующих текст программы и выдающих сообщения о возможном наличии логических ошибок в тексте программы.

Проверка адекватности математической модели объекта моделирования проводится, как правило, для случая, когда можно определить значение отклика объекта моделирования Y_0 и отклика математической модели Y_M . Как уже указывалось ранее, при этом рассматриваются различные нормы векторов Y_0 и Y_M . В случае, если адекватность математической модели оказывается неудовлетворительной, переходят к калибровке модели. Цель калибровки состоит в уменьшении неточностей формулировки модели, обусловленной ошибочной, или недостаточно подробной формулировкой компонент математической модели. В ходе калибровки математической модели можно производить изменения трёх типов: глобальные, структурные изменения (например, добавление программ процессов, компонент модели), локальные изменения модели (например, изменение компонент), изменение некоторых параметров, используемых в качестве калибровоч-

ных. При этом структурные изменения, как более трудно осуществимые, проводятся в последнюю очередь.

1.2.3.8.2. Исследование свойств математической модели.

После достижения требуемого уровня адекватности математической модели, необходимо оценить возможности разработанной модели, для чего необходимо исследовать свойства математической модели. На данном этапе оцениваются: 1. границы моделирования, 2. погрешности, возникающие в различных областях моделирования, 3. оценка времени решения и необходимых ресурсов, 4. оценка устойчивости и чувствительности математической модели.

Границы моделирования определяют допустимые изменения входных параметров, при которых модель сохраняет свои свойства.

Оценку погрешности необходимо выполнить по всей области моделирования, так как погрешности в различных точках области могут существенно отличаться.

Под устойчивостью математической модели понимается степень нечувствительности её к изменению входных величин. Универсальной процедуры проверки устойчивости не существует, потому при выполнении этой процедуры прибегают к различным частным тестам и здравому смыслу. Методика проверки устойчивости может быть следующей:

- определяется набор выходных величин, для которых оценивается устойчивость;
- входные величины варьируются на заданных уровнях в заданных диапазонах;
- по результатам изменения выходных величин оценивают устойчивость математической модели.

При оценке чувствительности математической модели устанавливается диапазон изменения отклика Y_M при изменении каждой входной величины U . Если при значительном изменении некоторой входной величины U отклик Y меняется незначительно, то это означает что чувствительность, связанная с данной величиной, не играет существенной роли и модель нечувствительна к этой входной величине. В противном случае необходимо уточнить описания компоненты, связанной с этой величиной.

1.2.3.8.3. Упрощение модели.

В общем случае любая модель включает бесконечное число элементов, переменных, соотношений, ограничений и так далее. Создавая модель, мы должны отбросить большую часть реальных свойств изучаемого объекта и использовать только те, которые соответствуют целям моделирования.

Например, разрабатывая модель для анализа кинематики некоторого механизма, мы не рассматриваем цвет элементов механизма, свойства материалов, из которых они изготовлены. В первую очередь, нас интересует геометрическое описание элементов и способы их связи. Таким образом, разработка модели свя-

зана с анализом объекта моделирования с целью максимально допустимого упрощения этого объекта.

Первоначальное упрощение объекта моделирования выполняется на этапах составления концептуальной модели и формального описания. Но часто встречается ситуация, когда приходится выполнять упрощение уже на последних этапах разработки модели. В этих случаях можно воспользоваться одним из следующих приёмов:

- понизить пространственную размерность модели;
- предположить процесс независимым от времени;
- ввести более жёсткие предположения и (или) ограничения;
- ввести более жёсткие граничные условия;
- исключить некоторые переменные или объединить их;
- заменить нелинейную зависимость линейной;
- переменные заменить константами.

Понижение пространственной размерности модели является эффективным приёмом, существенно упрощающим как разработку, так и эксплуатацию модели. Известно, что снижение пространственной размерности задачи на единицу сокращает объём вычислений на два-три порядка.

Предположение процессов, протекающих в модели независимо от времени (переход от динамической модели к статической) возможно даже в тех случаях, когда время играет существенную роль в моделирующих процессах. Такие модели, называются квазидинамическими и позволяют анализировать необходимые число статических состояний объекта моделирования в различные моменты времени.

Введение более жёстких предположений и ограничений может касаться структуры модели, отдельных её элементов, характера взаимодействия между ними, окружающей среды и её взаимодействия с объектом моделирования. Во всех случаях необходимо анализировать влияние вводимых изменений на модель в целом и характер получаемых результатов. Более жёсткие граничные условия могут привести к тому, что критические режимы работы моделируемого объекта окажутся вне рассматриваемой области, поэтому необходим дополнительный анализ для исключения подобных ситуаций.

Последние три приёма являются более частными и могут быть использованы как для модели в целом, так и для отдельных её элементов. Во всех случаях без исключения необходимо выполнять анализ влияния вводимых изменений на адекватность модели.

1.2.3.8.4. Вычислительный эксперимент.

Процесс построения модели должен быть тесно увязан с организацией машинных экспериментов. Машинный эксперимент называют также вычислительным, как правило, в тех случаях, когда используются численные методы. Роль вычислительного эксперимента в процессе моделирования чрезвычайно велика. Так как от того, какие задачи решались при построении модели зависит, какие вычислительные эксперименты можно выполнить и как эти эксперименты могут

быть поставлены. В свою очередь, вычислительный эксперимент определяется теми моделями, которые исследуются.

Для организации вычислительного эксперимента необходимо предварительно определить какая задача в процессе моделирования решается. Различают задачи анализа и синтеза технической системы.

Задачи анализа решают проблему определения свойств объекта проектирования. Одновариантный анализ позволяет определить исследуемые свойства при конкретном значении параметров объекта и условий взаимодействия с окружающей средой. Многовариантный анализ предполагает изучение изменения свойств объекта при изменении значений параметров объекта и (или) условий взаимодействия. При постановке задачи оптимизации многовариантный анализ выполняется по определённой схеме, причём изменение параметров на последующих этапах моделирования определяется результатами предыдущих этапов.

Задачи синтеза подразделяют на задачи параметрического и структурного синтеза. Параметрический синтез выполняют с целью определения числовых значений параметров при заданной структуре объекта. Структурный синтез выполняют с целью поиска типов элементов, составляющих объект и связей между ними. Решение задачи оптимизации предполагает многократное решение задач анализа с использованием оптимизационного алгоритма. Решение задач синтеза предполагает многократное решение задач оптимизации при различной их постановке.

1.2.3.9 Эксплуатация модели

Эксплуатация модели связана с решением конкретных задач пользователя при наличии подробной инструкции по эксплуатации с описанием модели, пояснениями и примерами, демонстрирующими её возможности.

1.2.4. ТИПОВЫЕ МОДЕЛИ ЭЛЕМЕНТОВ ДВС

Двигатель внутреннего сгорания является сложным объектом, функционирование которого осуществляется на базе разнородных по своей сущности физических процессов.

Описание этих процессов относится к различным областям знаний и строится исходя из различных принципов, допущений, законов и т.д. Поэтому конечное математическое описание модели оказывается довольно сложным ввиду того, что в нём объединены знания из различных областей физики, химии, прикладных технических областей знаний. Причём каждая из областей знаний использует свой математический аппарат. Первым шагом при создании и исследовании математических моделей должно быть выделение физически однородных подсистем. Для описания каждой из таких подсистем используется свой набор принципов, постулатов, понятий, образующихся в совокупности некоторых областей знаний. В инженерных исследованиях часто используются следующие области знаний: механика, гидромеханика, термодинамика и теплопередача, электричество, теория управления, прикладные области знаний.

1.2.4.1 Моделирование элементов ДВС на микроуровне

1.2.4.1.1 Предпосылки разработки математических моделей на микроуровне

Рассматриваемая область знаний изучает фундаментальные вопросы, представляющие основу теории упругости, газовой динамики, гидравлики и ряда других наук. Математическая модель на микроуровне рассматривает элементы ДВС на уровне физических состояний и процессов в сплошных средах. В зависимости от свойств, которыми наделяется сплошная среда, различают механику твёрдого тела, жидкости, газа и т. д. (табл. 4.1)

Таблица 4.1

Тело	Плотность	Сжимаемость	Касательное напряжение	
			статическое	динамическое
газ	мала	велика	0	мало
газ без внутреннего трения	мала	велика	0	0
жидкость	велика	мала	0	существенно
невязкая жидкость	велика	мала	0	0
несжимаемая жидкость	велика	нет	0	существенно
твёрдое тело	велика	мала	существенно	существенно
абсолютно твёрдое тело	велика	нет	существенно	существенно

Для описания поведения сплошных сред используются уравнения математической физики. Примерами таких уравнений являются уравнения теории упругости, термодинамики, газовой динамики и т. д. Типичными фазовыми переменными таких уравнений являются перемещения, температуры, плотности потоков, давления и т. д.

В двигателестроении наиболее часто инженер имеет дело с механическими, тепловыми, термодинамическими и газодинамическими процессами.

Тепловые процессы связаны с задачей исследования теплового состояния элементов ДВС. В основе таких моделей лежит уравнение теплопереноса в твёрдых телах, называемое уравнением теплопроводности. Результат решения уравнения теплопроводности – это поля температур и градиентов температур. Знание этих полей позволяет определить тепловые условия работы элементов ДВС.

Механические процессы связаны с задачей определения напряжённо-деформированного состояния деталей, вибраций и шума. В упругой области модели создают с использованием основного уравнения теории упругости – уравнения Ляме, отражающего условия равновесия сил, действующих на элемент твёрдого тела. Результатом решения задачи являются поля перемещений, деформаций и напряжений, позволяющие оценить прочность, долговечность конструкции.

Газодинамические процессы связаны с задачами проектирования газоздушных трактов ДВС, внутрицилиндровых процессов и систем наддува ДВС. В основе моделей газовой динамики лежат законы сохранения: закон сохранения массы, закон сохранения энергии, закон сохранения количества движения. Результатом решения задач газовой динамики являются поля скоростей, давлений, плотностей. Знание таких полей позволяет уменьшить потери в системах газообмена, организовать внутрицилиндровые процессы, сгорания, обеспечивающие заданные показатели ДВС, проектировать системы турбонаддува и согласовывать их работу с ДВС.

1.2.4.1.1.1 Уравнение переноса субстанции

Анализ элементов технической системы на микроуровне приводит к решению краевых задач математической физики. Основными уравнениями математической физики, используемыми для моделирования элементов технической системы на микроуровне, являются уравнения переноса энергии, вещества, количества движения (импульса). Все эти уравнения выводятся на основе законов сохранения субстанции в замкнутой системе. Получим обобщённое уравнение для некоторой субстанции, переносимой в движущейся среде. Для этого исследуемое тело или среду будем рассматривать как сплошную среду, пренебрегая её дискретным строением. Предположим, что сплошная среда однородна и изотропна по физическим свойствам. Для получения дифференциального уравнения рассмотрим движение бесконечно малого элемента сплошной среды. Пусть элемент имеет грани dx , dy , dz и объём dV (рис.4.1). Полный объём изучаемого тела равен

$$V = \int dV$$

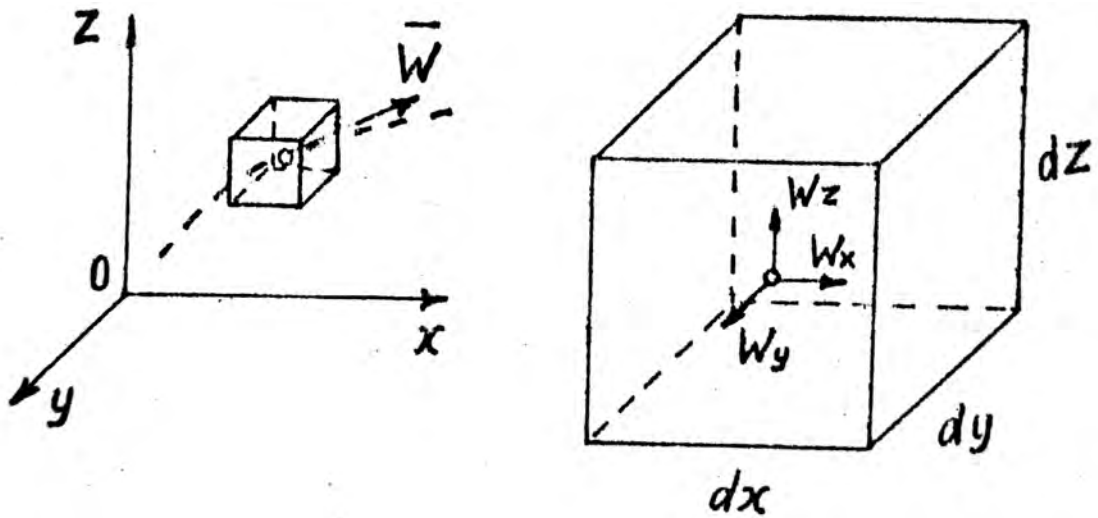


Рисунок 4.1 К выводу уравнения переноса субстанции

Если обозначить общее количество субстанции через Q , переносимой через объём V , то удельное значение переносимой субстанции, отнесённой к единице объёма, можно ввести как отношение $E = Q/V$. Тогда изменение во времени E в объёме V можно описать соотношением

$$\int_V (dE/d\tau) dV$$

Изменение субстанции в объёме определяется потоками субстанции через поверхность F , ограничивающую рассматриваемый объём:

$$\int_F J ndf$$

где J – плотность потока переносимой субстанции;

n – единичный вектор нормали к данной поверхности.

С целью перехода от интеграла по поверхности к интегралу по объёму выполним преобразования Остроградского-Гауса:

$$\int_F J ndf = \int_V \text{div } J dv$$

С учётом выполненного преобразования на основании закона сохранения можно записать

$$\int_v (dE/d\tau)dV = \int_v \operatorname{div} J dv$$

В предположении непрерывности подынтегральных функций выражение преобразуется к виду

$$dE/d\tau = \operatorname{div} J$$

Полная производная, стоящая в левой части имеет вид

$$\frac{dE}{d\tau} = \frac{\partial E}{\partial \tau} + \frac{\partial E \partial x}{\partial x \partial \tau} + \frac{\partial E \partial y}{\partial y \partial \tau} + \frac{\partial E \partial z}{\partial z \partial \tau}$$

или с учётом

$$w_x = \frac{\partial x}{\partial \tau}; \quad w_y = \frac{\partial y}{\partial \tau}; \quad w_z = \frac{\partial z}{\partial \tau};$$

$$\frac{dE}{d\tau} = \frac{\partial E}{\partial \tau} + w_x \frac{\partial E}{\partial x} + w_y \frac{\partial E}{\partial y} + w_z \frac{\partial E}{\partial z}$$

1.2.4.1.1.2 Уравнение сплошности

В основе уравнения сплошности лежит закон сохранения массы. Для потока жидкости с переменной плотностью ($\rho = \text{var}$) согласно закону сохранения разность между скоростью прихода массы в объём V и скоростью ухода из объёма равна скорости накапливания массы в объёме. В соответствии с полученными выше уравнениям можно записать

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \operatorname{div} \rho W = 0$$

где ρ - плотность жидкости.

1.2.4.1.1.3 Уравнение движения

Уравнение движения основано на законе сохранения количества движения, который гласит: изменение количества движения в элементе объёма жидкости V равно результирующей всех внешних сил, приложенных к поверхности и объёму элемента. По определению количество движения—это произведение массы выделенного объёма жидкости на его скорость:

$$m\bar{W} = \rho \cdot dx \cdot dy \cdot dz \cdot \bar{W}.$$

Закон сохранения количества движения может быть представлен в векторной или скалярной форме, в форме трех уравнений для составляющих количества движения и внешних сил по осям координат.

Рассмотрим поверхностные силы, действующие на трех из шести граней. Для описания полной силы на каждой из грани достаточно одного нормального и двух касательных напряжений. Объемные силы обозначим X, Y, Z . Сумму сил в направлении осей x, y, z представим в форме:

$$\begin{aligned}
& X dx dy dz + \frac{\partial}{\partial x}(\sigma_x dy dz) dx + \frac{\partial}{\partial y}(\tau_{xy} dx dz) dy + \frac{\partial}{\partial z}(\tau_{xz} dx dy) dz \\
& Y dx dy dz + \frac{\partial}{\partial x}(\tau_{yx} dy dz) dx + \frac{\partial}{\partial y}(\sigma_y dx dz) dy + \frac{\partial}{\partial z}(\tau_{yz} dx dy) dz \\
& Z dx dy dz + \frac{\partial}{\partial x}(\tau_{zx} dy dz) dx + \frac{\partial}{\partial y}(\tau_{zy} dx dz) dy + \frac{\partial}{\partial z}(\sigma_z dx dy) dz
\end{aligned}$$

Согласно закону сохранения, каждая из этих величин равна скорости изменения количества движения. Полное изменение скорости за единицу времени в направлении оси X обуславливается как изменением ее по времени, так и изменением, вызванным перемещением объема в поле скоростей

$$\frac{dw_x}{d\tau} + w_x \frac{dw_x}{dx} + w_y \frac{dw_x}{dy} + w_z \frac{dw_x}{dz} = \frac{Dw_x}{D\tau}.$$

Полученное выражение называется полной или субстанциональной производной. Ускорения в направлении осей Y и Z записываются аналогично:

$$\begin{aligned}
\frac{dw_y}{d\tau} + w_x \frac{dw_y}{dx} + w_y \frac{dw_y}{dy} + w_z \frac{dw_y}{dz} &= \frac{Dw_y}{D\tau} \\
\frac{dw_z}{d\tau} + w_x \frac{dw_z}{dx} + w_y \frac{dw_z}{dy} + w_z \frac{dw_z}{dz} &= \frac{Dw_z}{D\tau}.
\end{aligned}$$

Скорости изменения по времени составляющих вектора количества движения могут быть записаны в виде:

$$\rho dx dy dz \frac{Dw_x}{D\tau}; \quad \rho dx dy dz \frac{Dw_y}{D\tau}; \quad \rho dx dy dz \frac{Dw_z}{D\tau}.$$

Тогда закон сохранения количества движения в скалярной форме будет иметь вид:

$$\begin{aligned}
\rho \frac{Dw_x}{D\tau} &= X + \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z}; \\
\rho \frac{Dw_y}{D\tau} &= Y + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z}; \\
\rho \frac{Dw_z}{D\tau} &= Z + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z}.
\end{aligned}$$

1.2.4.1.1.4 Уравнение энергии

В основе уравнения энергии лежит закон сохранения энергии. Рассмотрим уравнение энергии для случая тепловой энергии. Если в полученном ранее выражении для субстанции поток рассматривается как тепловой поток, а плотность энергии рассматривается как интенсивность теплового потока, то после подстановки тепловых величин в уравнение для субстанции получим выражение для количества энергии:

$$\rho c \frac{DT}{D\tau} = \frac{\partial}{\partial x}(\lambda x \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\lambda y \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\lambda z \frac{\partial T}{\partial z}).$$

Для неподвижного элемента:

$$w_x = w_y = w_z = 0.$$

Предположив также постоянными величинами C , ρ , $a = \lambda/C\rho$, получим дифференциальное уравнение неподвижного твердого тела:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right).$$

Для стационарной задачи:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = 0, \quad \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \nabla^2 T = 0.$$

1.2.4.1.2 Механика упругого твердого тела

При проектировании различных элементов ДВС важное значение, для определения выходных параметров, имеет возможность определения напряженного деформированного состояния проектируемых элементов. Знание напряжений и деформаций, возникающих в элементах ДВС на различных режимах работы, позволяет оценить прочность, долговечность, виброустойчивость конструкции.

Модели для анализа напряжений и упругих деформаций твердых тел разрабатывают с использованием основного уравнения теории упругости: уравнения Ламе. Это уравнение получают из условия равновесия сил, действующих на элемент твердого тела, в напряжении оси x (рис.4.2):

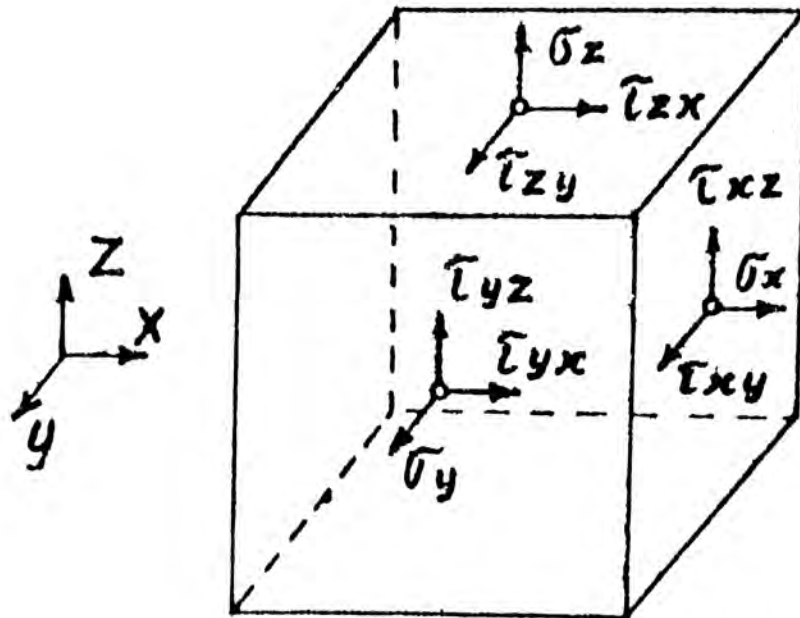


Рисунок 4.2. К выводу уравнения Ламе

$$\sum_{j=1}^3 \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + g_{Mi} = \rho \frac{\partial^2 w_i}{\partial \tau^2}; \quad i = 1..3,$$

где ρ - плотность;

g_{Mi} - проекция вектора массовых сил G_M , приходящихся на единицу объема, на ось X_j ;

w_i - перемещение элемента вдоль оси X_j ;

σ_{ij} - напряжение, действующее вдоль оси X_j на грань элемента, перпендикулярную оси X_i .

Напряжения связаны с деформациями, а деформации, в свою очередь, с перемещениями уравнениями, описывающими свойства сплошной среды. В случае линейной связи имеем:

$$\lambda = \frac{E\nu}{[(1+\nu)(1-2\nu)]}; \quad \mu = E/[2(1+\nu)];$$

$$\sigma_{ij} = \lambda \sum_{j=1}^3 \varepsilon_{ij} + 2\mu\varepsilon_{ij}, \quad \text{при } i = j;$$

$$\sigma_{ij} = 2\mu\varepsilon_{ij}; \quad \text{при } i \neq j.$$

где E - модуль упругости Юнга;

ν - коэффициент Пуассона.

Так как деформация связана с перемещением зависимостью

$$\varepsilon_{ij} = 0.5\left(\frac{\partial w_i}{\partial x_j} + \frac{\partial w_j}{\partial x_i}\right),$$

то после подстановки в исходное уравнение получим уравнение Ламе:

$$(\lambda + \mu)\text{grad}(\text{div}\bar{W}) + \mu\nabla^2\bar{W} + G_m = \rho \frac{\partial^2 \bar{W}}{\partial \tau^2};$$

где: \bar{W} - вектор перемещения;

∇^2 - оператор Лапласа.

В такой форме уравнения, как правило, не удастся довести до конечного решения, поэтому чаще в этом случае используются интегральные уравнения, вытекающие из вариационных принципов механики. Вариационный принцип Лагранжа устанавливает, что потенциальная энергия механической системы получает стационарное значение на тех кинематически возможных перемещениях, отвечающих заданным граничным условиям, которые удовлетворяют условиям равновесия систем. Математическое описание в данном случае представляется в виде:

$$\Pi = \mathcal{E} - A,$$

где Π - потенциальная энергия механической системы;

\mathcal{E} - энергия деформации системы;

A - работы внешних сил.

Выражение для энергии деформации всей системы имеет вид:

$$\mathcal{E} = 0.5 \int_V \varepsilon^T \sigma dV;$$

$$\varepsilon = (\varepsilon_{11}, \varepsilon_{22}, \varepsilon_{33}, \varepsilon_{12}, \varepsilon_{13}, \varepsilon_{23}); \quad \sigma = (\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}, \sigma_{12}, \sigma_{13}, \sigma_{23}),$$

где ε - вектор деформаций;

σ - вектор напряжений.

С учетом связи между деформациями и напряжениями $\sigma = D\varepsilon$. Окончательно получим:

$$\Pi = 0.5 \int_V \varepsilon^T D \varepsilon dv - A.$$

Минимизация полученного функционала, выполняемая одним из численных методов, позволяет рассчитать искомые значения перемещений, деформаций, напряжений.

1.2.4.1.3 Механика жидкостей и газов

Этот раздел знаний изучает законы равновесия и движения жидкостей и газов, а также их взаимодействия с твердыми поверхностями. При проектировании ДВС задачи такого типа встречаются при разработке моделей рабочего процесса, анализе систем впуска и выпуска, разработке ГРМ, смазочной системы и охлаждения. Математические модели жидких сред позволяют определить поля скоростей, давлений и плотности жидкости, движущиеся под действием внешних сил. Поскольку с математической точки зрения различия между жидкостью и газом заключаются в характере зависимости их плотности от давления, то используется одно понятие – жидкость.

К основным моделям в данной области относятся:

несжимаемая жидкость - капельная жидкость или газ, плотность которой не зависит от давления;

сжимаемая жидкость – газ, плотность которого меняется при изменении давления;

идеальная жидкость - жидкость, в которой отсутствует внутреннее трение;

баротропная жидкость - жидкость, плотность которой зависит только от давления.

Фазовыми переменными для всех моделей жидкости выступают:

скорость;

плотность;

давление.

В качестве законов сохранения рассматриваются:

1. Закон сохранения энергии

$$\frac{\partial P}{\partial \tau} + U \frac{\partial P}{\partial x} + \rho a^2 \frac{\partial a}{\partial x} = 0 \quad ; \text{ где } u - \text{ скорость, } a - \text{ скорость звука}$$

2. Закон сохранения массы, описываемый уравнениями неразрывности (сплошности) жидкости

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + U \frac{\partial \rho}{\partial x} + \rho \frac{\partial U}{\partial x} = 0; \quad , \text{ где } \rho - \text{ плотность, } U - \text{ скорость}$$

3. Закон сохранения количества движения, описываемый уравнением Эйлера для идеальной жидкости и уравнением Навье-Стокса для вязкой жидкости:

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} + U \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} = 0. \quad P - \text{давление}$$

Приведенные уравнения описывают нестационарное одномерное течение идеального газа.

1.2.4.1.4. Моделирование теплового состояния

Тепловые процессы играют определяющую роль в ДВС. Тепловое состояние деталей во многом определяет работоспособность, надежность и эффективные показатели. Температурное поле в сплошной среде описывается уравнением теплопроводности (уравнение Фурье):

$$c\rho \frac{dT}{d\tau} = \text{div}(\lambda \text{grad}T) + q.$$

Аналитическое решение уравнения возможно для тел простой формы: цилиндр, плоскость, шар. Решение уравнения Фурье для тел сложной формы возможно с использованием численных методов в виде значений температуры в заранее заданных точках тела.

1.2.4.1.5. Численные методы решения для моделирования элементов ДВС на микроуровне

Получить решение рассмотренных выше дифференциальных уравнений в виде некоторой функции удаётся только для простой формы и простых видов взаимодействия с внешней средой. Реальные конструкции элементов ДВС не соответствуют этим условиям, поэтому для их изучения на ЭВМ применяют численные методы. В этом случае решение получают в некоторых точках конструкции и для анализа необходимо многократное решение при разных формах и условиях нагружения. В настоящее время в двигателестроении наиболее часто используются методы сеток и конечных элементов.

1.2.4.1.5.1 Метод сеток

Метод сеток наиболее часто используется при решении задач газовой динамики. Он позволяет свести решение системы уравнений в частных производных к решению системы алгебраических уравнений. Дискретизация исследуемой области заключается в покрытии области некоторой сеткой. Точки пересечения сетки называют узловыми точками или просто узлами. Узлы, находящиеся внутри области, называются внутренними, а находящиеся на границе – граничными узлами. Расстояние между соседними узлами называют шагом. Сетка может быть прямоугольной, косоугольной, с постоянным или переменным шагом. (рис.4.3)

Алгебраизация задачи заключается в замене по определённым правилам дифференциальных операторов уравнений в частных производных соответствующими разностными аналогами, в результате чего получают сеточные уравнения, связывающие значения искомой функции в узлах сетки. При этом

непрерывная искомая функция аппроксимируется некоторой сеточной функцией.

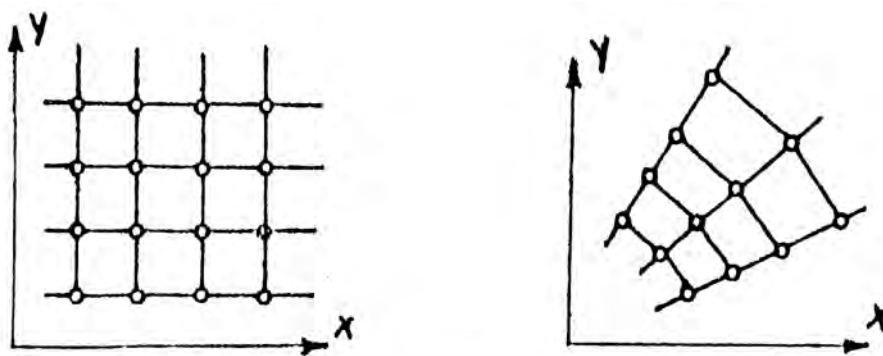


Рисунок 4.3. Фрагменты некоторых сеток

Используется множество способов построения сеточной функции. Вид разностных операторов представляют графически в форме шаблонов. Шаблон представляет собой часть сетки, включающую узлы, значения функции в которых используются для аппроксимации производных в заданном узле. На рис.4.4 показаны примеры шаблонов для аппроксимации двумерных и нестационарных одномерных задач.

Рассмотрим процедуру замены дифференциального оператора разностным аналогом на примере двумерной стационарной задачи распространения тепла при отсутствии источников. В этом случае дифференциальное уравнение имеет вид

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0$$

Расположим исследуемую плоскую область в первом квадранте декартовой системы координат и нанесём на неё сетку (рис.4.5). Температуры в точках 0, 1, 2, 3, 4 обозначим T_0, T_1, T_2, T_3, T_4 . Градиент температуры в направлении оси x для точки O' запишем в виде

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x+\Delta x/2, y=(T_2-T_0)/\Delta x}$$

Аналогично можно записать для точки O'

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x-\Delta x/2, y=(T_0-T_1)/\Delta x}$$

Определим вторую производную по оси x для точки O

$$\left. \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right|_{x, y} \approx \frac{1}{\Delta x} \left[\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x+\Delta x/2, y} - \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x-\Delta x/2, y} \right] = (T_1 + T_2 - 2T_0) / \Delta x^2.$$

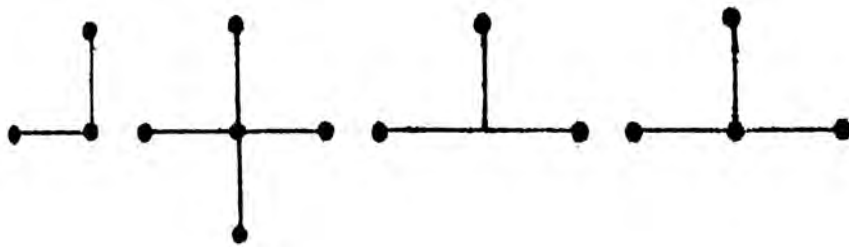


Рисунок 4.4. Примеры шаблонов для аппроксимации двумерных и нестационарных одномерных задач

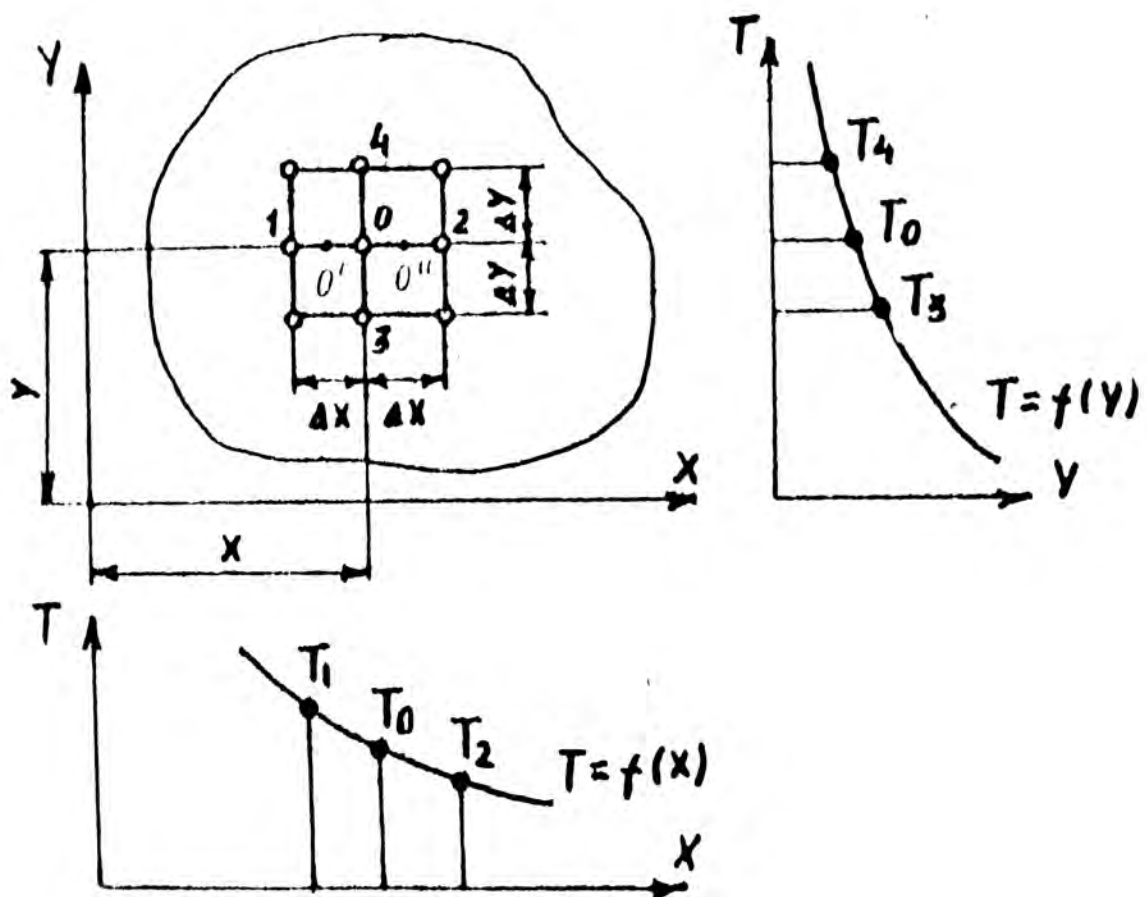


Рисунок 4.5. Сетка для плоской области

Вторую производную для точки O в направлении оси y определим аналогично

$$\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \Big|_{x, y} \approx (T_3 + T_4 - 2T_0) / \Delta y^2.$$

Подставив значения вторых производных в дифференциальное уравнение при условии $\Delta x^2 = \Delta y^2 = \Delta$, получим сеточное уравнение:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = \frac{(T_1 + T_2 + T_3 + T_4 - 4T_0)}{\Delta} = 0$$

Для получения температур в узлах области необходимо решить систему уравнений, получаемую путём описания всех узлов области с помощью полученного сеточного уравнения. Причём уравнения для граничных узлов определяются их положением и граничными условиями.

1.2.4.1.5.2 Метод конечных элементов

МКЭ для описания сплошных сред впервые был применён в середине 50-х годов и с тех пор является исключительно полезным методом для инженерных расчётов. Он широко применяется в гидродинамике, теории поля, при расчёте сложных напряженных состояний и в других областях. МКЭ применяется для решения тех же задач, что и метод конечных разностей, но основан на других идеях. В методе конечных разностей проводится разностная аппроксимация производных, входящих в дифференциальные уравнения. Математическая основа МКЭ - вариационное исчисление. Дифференциальное уравнение, описывающее задачу, и соответствующие граничные условия используются для постановки вариационной задачи, которая решается затем непосредственно. В МКЭ физическая задача заменяется кусочно-гладкой моделью. В этом смысле МКЭ позволяет инженеру использовать своё интуитивное понимание задачи.

Основные этапы применения МКЭ показаны на рис. 4.6.

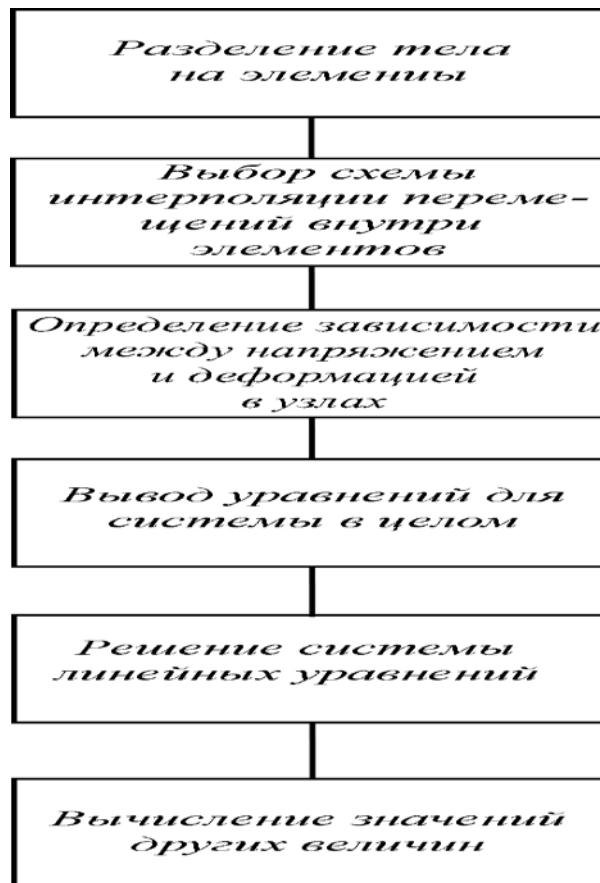


Рисунок 4.6. Основные этапы применения МКЭ

Первый этап состоит в разделении тела на малые элементы простой формы, соприкасающиеся в точках, которые называются узлами. Разделение на элементы можно выполнить разными способами, так как выбор размеров, формы и ориентации элементов определяется представлениями инженера о том, как проще решить данную задачу. Элементы плоского тела имеют обычно треугольную или четырёхугольную форму, а элементы трёхмерных тел - форму тетраэдров или гексаэдров. Те участки тела, для которых из физических соображений требуется получить более детальную информацию, разбиваются на большее число мелких элементов. Если физические свойства тела изменяются в точке или вдоль линии, то можно изменить форму, размеры или ориентацию элементов на этом участке. На рис. 4.7. Показано разбиение равномерно нагруженной квадратной пластины с эллиптическим отверстием в центре на треугольных конечных элементов. Так как пластина имеет две оси симметрии, то рассматривается только одна её четверть. Размеры элементов вблизи отверстия уменьшаются, что позволяет получить более подробную информацию о тех участках пластин, на которых велики градиенты напряжений. На рис.4.8. Нумеруются, как элементы, так и узлы, это облегчает ввод исходных данных в программу счёта МКЭ. Равномерное нагружение в данном случае моделируется приложением сосредоточенных сил в узлах.

Следующий этап применения МКЭ состоит в выборе какой-либо простой схемы интерполяции, позволяющей выразить перемещение в любой точке

внутри элемента через его значения в узлах. Обычно перемещение задаётся каким-нибудь простым полиномом. В пределах каждого элемента для интерполяции значений перемещения используются полиномы с коэффициентами, определяемыми в процессе решения.

На следующем этапе выписываются зависимости между напряжениями и деформациями в узлах всех элементов. На этой стадии с большой пользой может быть использована концепция матрицы коэффициентов влияния. Зная соотношения между напряжениями и деформациями элементов, можно построить такие же соотношения для системы в целом. При этом деформация соприкасающихся элементов должны быть равны, а силы, действующие в узлах, должны составлять в сумме внешнюю силу, приложенную в той же точке. В результате получается система линейных уравнений вида

$$[K] \{d\} = \{R\} ,$$

Где $[K]$ – известная матрица жесткости системы, $\{d\}$ - вектор перемещения системы, а $\{R\}$ - вектор нагрузки. Полученная система уравнений содержит довольно много нулевых элементов, т.к. не каждый узел принадлежит каждому элементу. В случае произвольной деформации каждый из m узлов может иметь n независимых перемещений. Поэтому матрица жесткости будет иметь размерность $nm \times nm$, а векторы деформации и силы – размерность nm .

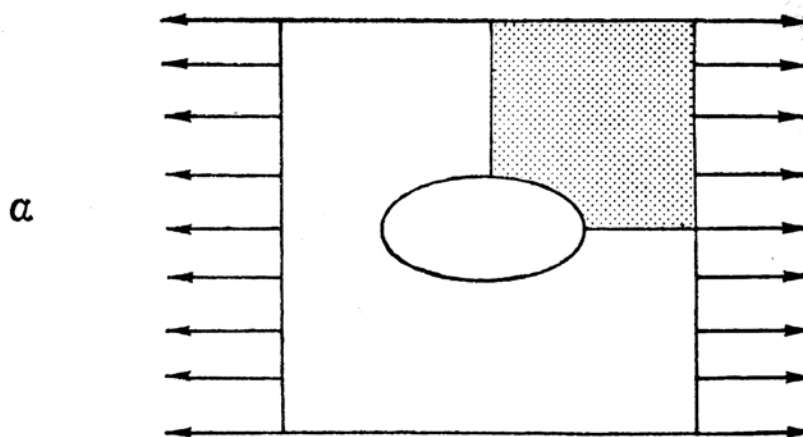


Рисунок 4.7. Разбиение квадратной пластины на элементы

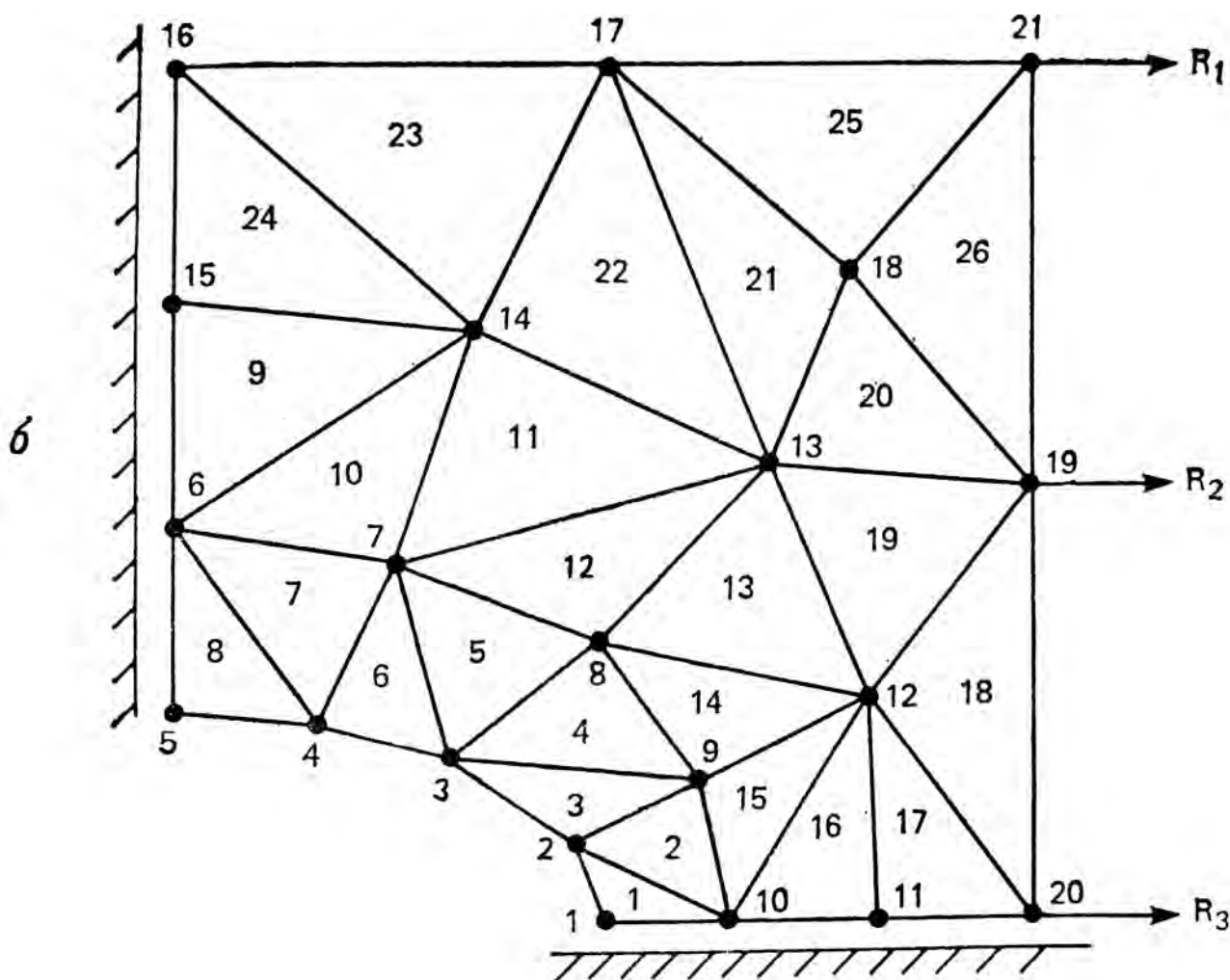


Рисунок 4.8. Нумерация элементов и узлов

Некоторые значения перемещений непосредственно определяются граничными условиями. Известные значения перемещения можно исключить из системы уравнений и тем самым понизить её порядок.

Матричные методы позволяют лучше организовать подготовку программы и решение задачи. Универсальность МКЭ позволила разработать на его основе программы для ЭВМ для решения разнообразных задач.

1.2.4.2. Моделирование элементов ДВС на макроуровне.

1.2.4.2.1. Предпосылки разработки моделей на макроуровне

При моделировании систем и узлов ДВС на макроуровне для создания модели выделяют простейшие элементы, последующее объединение которых позволяет получить модель в целом. Как правило, в зависимости от вида преобразования энергии используют три простейших элемента : диссипативный элемент R , емкостный элемент C , индуктивный элемент L .

В диссипативном элементе происходят потери энергии. В емкостном элементе происходит накопление потенциальной энергии, а в индуктивном элементе - накопление кинетической энергии.

Различные сочетания этих элементов совместно с источниками фазовых переменных позволяют строить модели реальных систем на макроуровне. Для различных систем физическая интерпретация элементов различна, однако имеет место сильная аналогия, приводящая к значительной общности описания объектов различной физической природы. В таб. 4.2 и таб. 4.3 представлены аналогии фазовых переменных и параметров элементов.

Таблица 4.2

Подсистема	Фазовые переменные типа	
	поток	потенциал
Электрическая	ток	напряжение
Тепловая	тепловой поток	температура
Механическая		
Поступательная		скорость
Вращательная	момент	угловая скорость
Гидромеханическая	расход	давление

Таблица 4.3.

Подсистема	Компоненты		
	R	C	L
Электрическая	сопротивление	ёмкость	индуктивность
Тепловая	тепловое сопротивление	теплоёмкость	-
Механическая			
Поступательная	трение	масса	податливость
Вращательная	трение	момент инерции	крутильная податливость
Гидромеханическая	гидравлическое сопротивление	гидравлическая ёмкость	гидравлическая индуктивность

1.2.4.2.2. Моделирование механических систем

Как правило, инженер имеет дело с движением тел со скоростями, значительно меньшими скорости света, поэтому в дальнейшем рассмотрим модели, базирующиеся на классической ньютоновской механике. Данный раздел знаний изучает простейшую форму движения материи - механическое движение, которое заключается в изменении взаимного расположения тел и (или) их частей в пространстве с течением времени.

Основные принципы и постулаты классической механики, используемые в этом случае, перечислены ниже.

Основные принципы:

описание движения материального тела в пространстве и во времени;
принцип относительности движения.

Фундаментальные понятия:

инерциальная система отсчета;
материальная точка;
траектория;
скорость;
масса;
взаимодействия.

Основные постулаты:

геометрия пространства – евклидова;
пространство по отношению к замкнутой механической системе однородно и изотропно;

время однородно;

принцип относительности – галилеев.

Основной закон - закон сохранения.

В зависимости от целей моделирования различают статику, кинематику и динамику механической системы.

Основные модели реальных объектов, используемые при моделировании на макроуровне, приведены в табл. 4.4.

Таблица 4.4

Материальная точка	Материальное тело, размер и форма которого в рассматриваемой задаче не-существенны.
Абсолютно жёсткое тело	Тело, расстояние между двумя любыми точками которого неизменно.
Система материальных точек	Мысленно выделенное множество материальных точек, взаимодействующих друг с другом и с окружающей средой.
Система абсолютно жёстких тел	Мысленно выделенное множество абсолютно жёстких тел, взаимодействующих друг с другом и с окружающей средой.

При моделировании механических систем помимо моделей тел используются модели взаимодействий между телами называемые связями.

Связь - это ограничение, накладываемое на механическую систему или ее элементы. Различают стационарные (голономные) и нестационарные (реономные) связи. Если связь накладывает ограничения только на перемещения в про-

странстве, то ее называют геометрической. Если ограничения накладываются и на перемещение и на скорость, то связь называют кинематической. Примеры моделей связей: абсолютно жесткая невесомая нить, гибкая невесомая нить, упругий элемент и т.д. Основными фазовыми переменными механических систем на макроуровне выступают: перемещение (относительное и абсолютное), скорость, ускорение, сила.

При моделировании механических систем на макроуровне различают механическую, поступательную и механическую вращательную системы.

1.2.4.2.2.1. Моделирование механических поступательных систем

В качестве простейших элементов механических поступательных систем выступают (рис. 4.9);

элемент, моделирующий свойство инерционности (элемент массы);

элемент, моделирующий свойство упругости (упругий элемент);

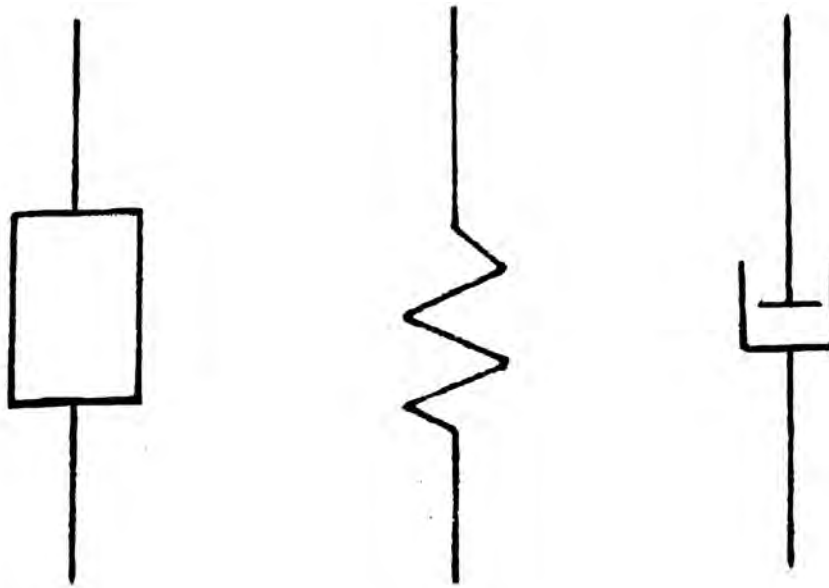


Рисунок 4.9. Схемы простейших элементов механических поступательных систем

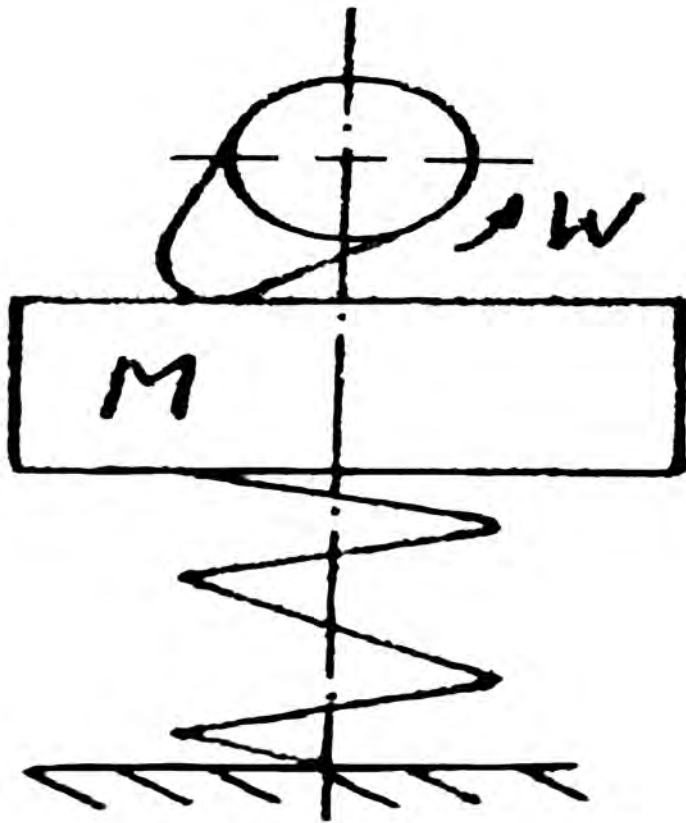


Рисунок 4.10. Модель для анализа динамики газораспределительного механизма с верхним расположением распределительного вала

элемент, моделирующий потери механической энергии (диссипативный элемент).

Компонентное уравнение элемента массы определяется вторым законом Ньютона

$$F = \frac{d(mV)}{d\tau},$$

где m -масса, v -скорость, F -сила.

Для упругого элемента компонентное уравнение связывает между собой силу и перемещение

$$F = c l,$$

где c - жесткость; l - перемещение.

Компонентное уравнение диссипативного элемента определяется принятыми свойствами элемента. Например, в случае, когда сила трения определяется нормальным давлением, компонентное уравнение диссипативного элемента будет иметь вид

$$F = fN,$$

где f - коэффициент трения; N - нормальное давление.

Топологическими уравнениями для моделей поступательных механических систем являются:

уравнение равновесия сил (принцип Даламбера);

$$\sum_{i=1}^n F_i = 0$$

уравнение, выражающее принцип сложения скоростей, согласно которому сумма абсолютной, относительной и переносной скоростей равна нулю:

$$\sum_{i=1}^m V_i = 0$$

Рассмотрим в качестве примера модель для анализа динамики газораспределительного механизма с верхним расположением распределительного вала при абсолютно жестком приводе клапана (рис.4.10). В этом случае модель состоит из упругого элемента 1, приведенной массы клапана 2 и кулачка 3, вращающегося с угловой скоростью W и определяющего закон движения. Приведенная масса M клапана перемещается в такой модели кулачком, профиль которого совпадает с профилем реального кулачка. Вследствие простой структуры модели ГРМ для составления уравнения движения массы M можно использовать второй закон Ньютона. В общем случае на приведенную массу M действуют: суммарное усилие пружин P_n ; сила трения P_t ; сила давления газов на тарелку клапана P_r .

Тогда уравнение движения массы M будет иметь вид

$$Mx'' = -P_n - P_t - P_r$$

где x - действительное (с учетом упругих деформаций звеньев)

перемещение массы M , совпадающее с перемещением клапана.

Решение данного уравнения осуществляется численными методами, например, методом Рунге-Кутты четвертого порядка с автоматическим выбором шага интегрирования.

1.2.4.2.2.2. Моделирование механических вращательных систем

При моделировании механических вращательных систем в качестве простейших элементов выступают, (рис. 4.11):

элемент, моделирующий свойство инерционности, описываемый моментом инерции относительно некоторой оси;

элемент, моделирующий свойство упругости, описываемый крутильной жесткостью;

элемент, моделирующий потери механической энергии (диссипативный элемент).

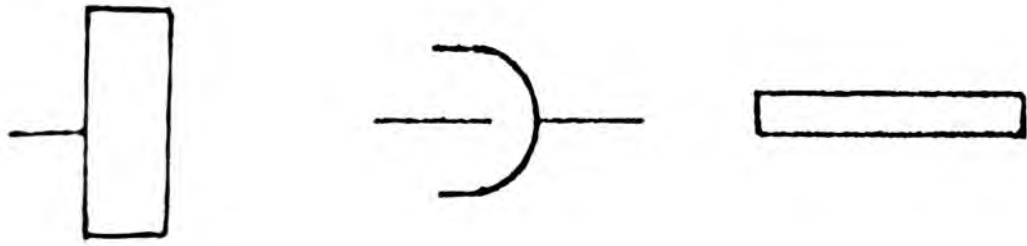


Рисунок 4.11. Схемы простейших элементов механических вращательных систем

Фазовыми переменными механической вращательной системы выступают: момент сил M , угол поворота θ , угловая скорость \dot{W} .

Компонентное уравнение для инерционного элемента имеет вид

$$M = I \left(\frac{d\dot{W}}{dt} \right).$$

При достаточно малых углах поворота θ , компонентное уравнение для элемента, отображающего свойства упругости, имеет вид

$$M = C\theta.$$

Для вязкого трения компонентное уравнение диссипативного элемента будет иметь вид:

$$M = \frac{W}{R},$$

где $R=1/k$ – коэффициент трения вращения.

Рассмотрим математическую модель механической вращательной системы на примере одномассовой крутильной системы с одной степенью свободы (рис. 4.12.).

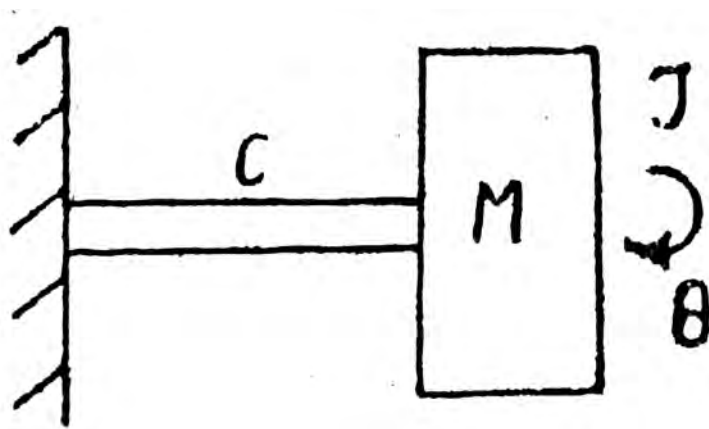


Рисунок 4.12. Одномассовая крутильная система с одной степенью свободы

Запишем выражение для кинематической и потенциальной энергии рассматриваемой системы

$$T = \frac{I(\theta')^2}{2}; U = \frac{C\theta^2}{2}.$$

Так как кинетическая энергия зависит от скорости колебаний $T(\theta')$, а потенциальная энергия от деформаций $U(\theta')$, то уравнение Лагранжа второго рода будет иметь вид

$$\frac{\partial}{\partial \tau} \left(\frac{\partial T}{\partial \theta'} \right) + \frac{\partial U}{\partial \theta} = 0.$$

Продифференцируем уравнения для кинематической и потенциальной энергий

$$\frac{\partial T}{\partial \theta'} = I\theta'; \quad \frac{\partial}{\partial \tau} \left(\frac{\partial T}{\partial \theta'} \right) = I\theta'';$$

$$\frac{\partial U}{\partial \theta} = C\theta.$$

После подстановки полученных значений в уравнение Лагранжа получим $I\theta'' + C\theta = 0$

Подставив в полученное уравнение значение угловой частоты

$$W_c = \sqrt{\frac{C}{I}},$$

получим $\theta'' + W_c^2\theta = 0$

Решение полученного дифференциального уравнения имеет вид

$$\theta = C_1 \cos W_c\tau + C_2 \sin W_c\tau.$$

Считая, что в начальный момент времени получим выражения для C_1 и C_2

$$C_1 = \theta_0; \quad C_2 = \theta_0/\omega_c$$

После подстановки окончательно получим

$$\theta = \theta_0 \cos \omega_c \tau + \theta_0/\omega_c \sin \omega_c \tau$$

1.2.4.2.3. Моделирование газодинамических систем.

При проектировании газодинамических систем на макроуровне рассматриваются изменения состояний газовой среды при прохождении различных элементов технической системы. Наличие вязкого трения обуславливает появление гидравлического сопротивления. Математическая модель гидравлического сопротивления определяется геометрией трубопровода и режимом течения.

Гидравлическая индуктивность определяется отношением

$$L_{\Gamma} = l / S,$$

где l - длина участка трубопровода;

S - площадь поперечного сечения.

Гидравлическая емкость для некоторой полости может быть определена

соотношением

$$C_{\Gamma} = S l \rho / E$$

В качестве топологических уравнений в гидравлических системах используются:

уравнение равновесия в узлах

$$\sum_{i=1}^n Q_i = 0,$$

где Q_i - входящий или уходящий из узла поток;

уравнение неразрывности (сумма падений давлений при отходе по контуру равна нулю)

$$\sum_{j=1}^m \Delta P_j = 0,$$

где ΔP_j - падение давления на ветви, входящей в контур.

В качестве примера рассмотрим задачу проектирования впускного трубопровода ДВС с наддувом на участке турбокомпрессор-охладитель. Целью проектирования является выбор параметров трубопровода, обеспечивающих наименьшие потери давления. Для создания модели трубопровода представим его в виде однородных с точки зрения физических процессов компонентов - участков трубопровода. Можно выделить шесть типовых участков (рис. 4.13.):

- участок с постоянным диаметром, определяемый параметрами D и L ;
- участок резкого расширения, определяемый параметрами D_1 и D_2 ;
- участок резкого сужения, определяемый параметрами D_1 и D_2 ;
- участок плавного расширения, определяемый параметрами D_1 , D_2 и длиной L ;
- участок плавного сужения, определяемый параметрами D_1 , D_2 и длиной L ;
- участок плавного закругления, определяемый параметрами D и R .

Для каждого участка можно записать уравнения, описывающие изменение давления и скорости потока при прохождении участка, которые будут

компонентными уравнениями. Топологическая модель определяет последовательность прохождения участков потоком. Зная условия на входе в трубопровод, можно определить параметры потока на выходе из трубопровода, то есть определить эффективность варианта конструкции. Сравнение различных вариантов позволяет выбрать наилучший.

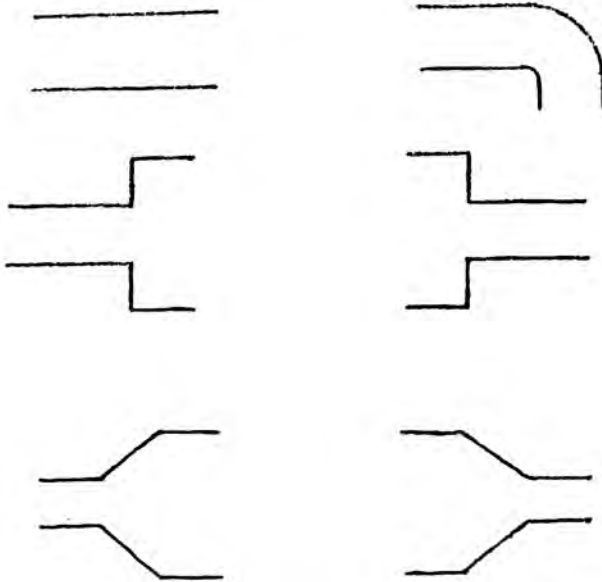


Рисунок 4.13. Шесть типовых участков трубопровода

1.2.4.2.4. Моделирование тепловых систем.

Фазовыми переменными для тепловой системы являются тепловой поток и температура. Для моделирования тепловых процессов на макроуровне используются элементы теплового сопротивления и теплоемкости. Математическое описание для элемента сопротивления вытекает из уравнения Фурье

$$q = h \Delta T / l;$$

где q - плотность теплового потока;
 h - коэффициент теплопроводности;
 T – температура.

По определению, удельная теплоемкость равна:

$$C = d Q / dT.$$

В качестве топологических уравнений в тепловых системах используются:

- уравнение равновесия в узлах (сумма тепловых потоков в узлах системы равна нулю)

$$\sum_{i=1}^n q_i = 0,$$

где q_i - количество тепла, подводимого или отводимого в узле;
 - уравнение непрерывности - (сумма перепадов температур при обходе по замкнутому контуру равна нулю)

$$\sum_{j=1}^n \Delta T = 0,$$

где ΔT – перепад температур на участке, входящем в контур.

Типичной моделью тепловой системы на макроуровне является тепловой баланс двигателя, описывающий распределение тепла в ДВС. Для карбюраторного ДВС при $\alpha > 1$ такое уравнение имеет вид

$$Q_0 = Q_1 + Q_b + Q_{\Gamma} + Q_{\text{ост}},$$

где Q_0 - количество тепла, выделившегося в цилиндре ДВС

$$Q_0 = \eta_u G_T / 3,6;$$

Q_1 - количество тепла, превращенного в полезную работу,

$$Q_{\Gamma} = 1000N_1;$$

Q_b - количество тепла, перешедшего в систему охлаждения,

$$Q_b = C_{\text{ох}} G_{\text{ох}} \Delta T;$$

Q_{Γ} - количество тепла, ушедшего с отработавшими газами,

$$Q_{\Gamma} = \frac{G_T}{3,6} [M_2 (m_{\text{с}}^{\text{п}})^0 (T_{\Gamma} - 273) - M_1 (m_{\text{ср}})^0 (T_{\text{с}} - 273)];$$

$Q_{\text{ост}}$ - неучтенное количество тепла.

4.3. Предпосылки разработки математических моделей на метауровне.

Моделирование на метауровне при проектировании ДВС связано с применением теории автоматического управления. Поведение двигателя в

этом случае описывается системой обыкновенных дифференциальных уравнений.

Рассмотрим в качестве примера задачу регулирования частоты вращения ДВС. Для работы ДВС на заданном скоростном режиме при заданной нагрузке $N = \text{const}$, в цилиндр должна впрыскиваться определенная доза топлива, что обеспечивается определенным положением рейки топливного насоса. Автоматический регулятор частоты вращения связан с коленвалом ДВС, и частота вращения является одним из входных параметров регулятора. Другим входным параметром является положение рычага управления регулятора, с помощью которого меняется настройка регулятора φ . Значения ω и φ определяют перемещение рейки топливного насоса l . Функциональная схема системы регулирования частоты вращения ДВС представлена на рис. 4.14.

Как видим, в данном случае ДВС выступает в качестве элемента системы регулирования, который по двум входным параметрам M_c и φ меняет частоту вращения коленвала. Другой элемент системы регулирования - регулятор, который по входным параметрам ω и φ меняет положение рейки топливного насоса l , что приводит к изменению цикловой подачи топлива.

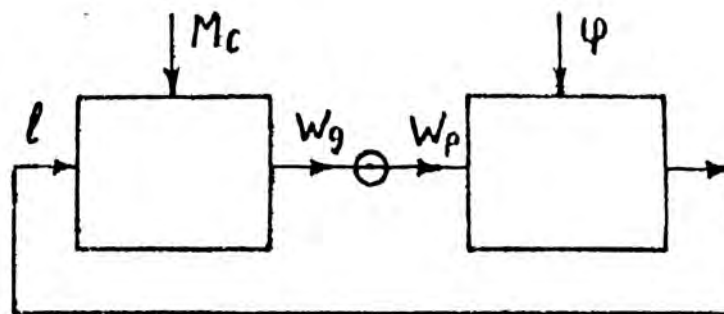


Рисунок 4.14. Функциональная схема системы регулирования частоты вращения коленчатого вала двигателя внутреннего сгорания

1.2.4.4. Статистические модели

При проектировании и эксплуатации ДВС весьма актуальной проблемой является определение таких значений конструктивных и регулировочных параметров, которые обеспечивали бы заданную эффективность его работы. Решение этой задачи возможно при наличии соответствующих моделей, учитывающих реальные эксплуатационные режимы работы ДВС. Такие модели могут быть разработаны путем статистической обработки данных, полученных в результате натурных стендовых или эксплуатационных испытаний ДВС. Одним из наиболее широко используемых методов построения моделей такого типа является корреляционный и регрессионный анализ. Корреляционный анализ позволяет дать количественную

оценку связей между параметрами ДВС. Регрессионный анализ позволяет построить модель, описывающую зависимость между параметрами.

Последовательность разработки регрессионной модели включает этапы:

- планирование эксперимента;
- проведение эксперимента;
- статистическая обработка результатов;
- проверка и эксплуатация модели.

1.2.4.4.1. Планирование эксперимента.

Статистические методы обработки экспериментальных данных, как правило, требуют большого количества исходной информации, что приводит к большим затратам при проведении эксперимента. В связи с этим возникает задача о рациональном планировании эксперимента, обеспечивающем получение эмпирических моделей с заданной точностью при минимальном числе опытов.

Как правило, составляющие математической модели зависят от нескольких факторов. Для установления влияния каждого из факторов необходимо задать ему не менее пяти значений, что приводит к большому количеству опытов даже при небольшом количестве факторов. Например, для исследования влияния трех факторов, каждый из которых принимает по пять значений, необходимо выполнить $5 \times 3 = 125$ опытов.

Теория планирования эксперимента позволяет составить план эксперимента таким образом, чтобы при минимальном числе опытов равномерно охватить всю область возможных значений факторов. Для этих целей можно использовать специальный комбинационный квадрат. Рассмотрим пример использования комбинационного квадрата для случая трех факторов, каждый из которых может принимать пять значений (табл. 4.5).

Полный квадрат имеет 125 клеток. Планирование эксперимента включает следующие этапы:

- заполнение комбинационного квадрата;
- расстановка точек в комбинационном квадрате;
- проведение эксперимента в соответствии с установленными сочетаниями факторов.

Точки расставляются таким образом, чтобы отсутствовало повторение сочетаний факторов и чтобы планируемый режим мог бы быть реализован на испытуемом объекте. После выполнения эксперимента в предпоследнюю колонку заносятся экспериментальные данные. После построения модели выполняется моделирование работы объекта на выбранных режимах и результаты заносятся в последнюю колонку.

Таблица 4.5

	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	эксп	расч
1												х					
2						х											
1 3				х													
4																	
5																	
1	х																
2								х									
2 3																	
4																	
5																	
1																	
2		х															
3 3																	
4										х							
5															х		

Комбинационный квадрат для составления плана эксперимента при 3-х факторах, меняющих на 5-ти уровнях.

1.2.4.4.2. Обработка результатов эксперимента.

Статистическая обработка данных заключается в выполнении корреляционного и регрессионного анализа. Основная цель корреляционного анализа - оценка значимости связей между параметрами. Количественно связь между параметрами оценивается коэффициентом корреляции. Коэффициент корреляции представляет собой число, значение которого находится в пределах $-1 \dots +1$, включая значение 0.

Знак перед коэффициентом указывает, является ли корреляция отрицательной (-), или положительной (+). При оценке тесноты связи между параметрами обычно считают:

Значение коэффициента корреляции	Качественная оценка коэффициента корреляции
0.0 ... 0.2	Отсутствие связи
0.2 ... 0.5	Слабая связь
0.5 ... 0.75	Средняя связь
0.75 ... 0.95	Сильная связь
0.95 ... 1.00	Практически функциональная связь

В результате корреляционного анализа получают матрицу парных или частных коэффициентов корреляции. В отличие от парного коэффициента корреляции, частный коэффициент корреляции оценивает связь между двумя параметрами при фиксированном значении остальных параметров. Так как коэффициенты корреляции оцениваются по результатам обработки некоторой выборки из генеральной совокупности исследуемых параметров, то по своей природе они являются случайными величинами. Проверка значимости значения коэффициента корреляции выполняется при помощи критерия Стьюдента, для чего наблюдаемое значение критерия сравнивается с табличным.

В регрессионном анализе рассматривается связь между одним параметром, называемым зависимой переменной или откликом, с множеством других параметров, называемыми независимыми переменными или факторами. Уравнение, описывающее связь между зависимой и множеством независимых переменных, называется уравнением регрессии. Вид регрессионного уравнения устанавливается на основе анализа физической сущности явления. Если нет теоретических соображений о виде регрессионного уравнения, то в общем случае оно может быть представлено в виде:

$$Y = \sum_{i=1}^n B_i F_i(x) + E,$$

где B_i - коэффициенты регрессии;
 F_i - базисные функции;

- E - погрешность;
- x - вектор независимых переменных;
- Y - зависимая переменная.

Наиболее часто в качестве базисных функций используются полиномы и тригонометрические функции.

Коэффициенты корреляции являются случайными величинами, так как рассчитываются по выборочным данным. Оценка значимости коэффициентов осуществляется с использованием t-критерия Стьюдента. Если наблюдаемое значение критерия больше теоретического, то предположение о нулевом значении критерия не подтверждается.

Примерами статистических моделей могут служить модели изменения мощности NI, крутящего момента MI и удельного часового расхода топлива qI, используемые для теоретического построения внешней скоростной характеристики карбюраторных ДВС:

$$N_{e,x} = N_e - nN \left[1 - \frac{nN}{nN} - \left(\frac{nN}{nN} \right)^2 \right];$$

$$M_{e,x} = \frac{3 \cdot 10^{-4} N_{e,x}}{\pi n x};$$

$$q_{e,x} = q_{e,N} \left[1,2 - \frac{nN}{nN} + 0,8 \left(\frac{nN}{nN} \right)^2 \right];$$

1.2.4.5. Система математических моделей ДВС

Сложность технической системы определяет количество и сложность математических моделей для ее описания. Даже для описания одного и того же элемента необходимо иметь набор моделей различной сложности. В системах САПР необходимо использовать функционально обоснованную и информационно организованную систему моделей, так как в противном случае возникают непроизводительные затраты. Для полного описания системы математических моделей ДВС потребовалось бы слишком много времени. Поэтому мы ограничимся схемой, отражающей часть системы математических моделей на верхних уровнях иерархии рис. 4.15.

На различных этапах проектирования, в зависимости от решаемых задач, инженер использует соответствующие модели, меняя постановку задачи, условия взаимодействия с внешней средой, параметры модели.

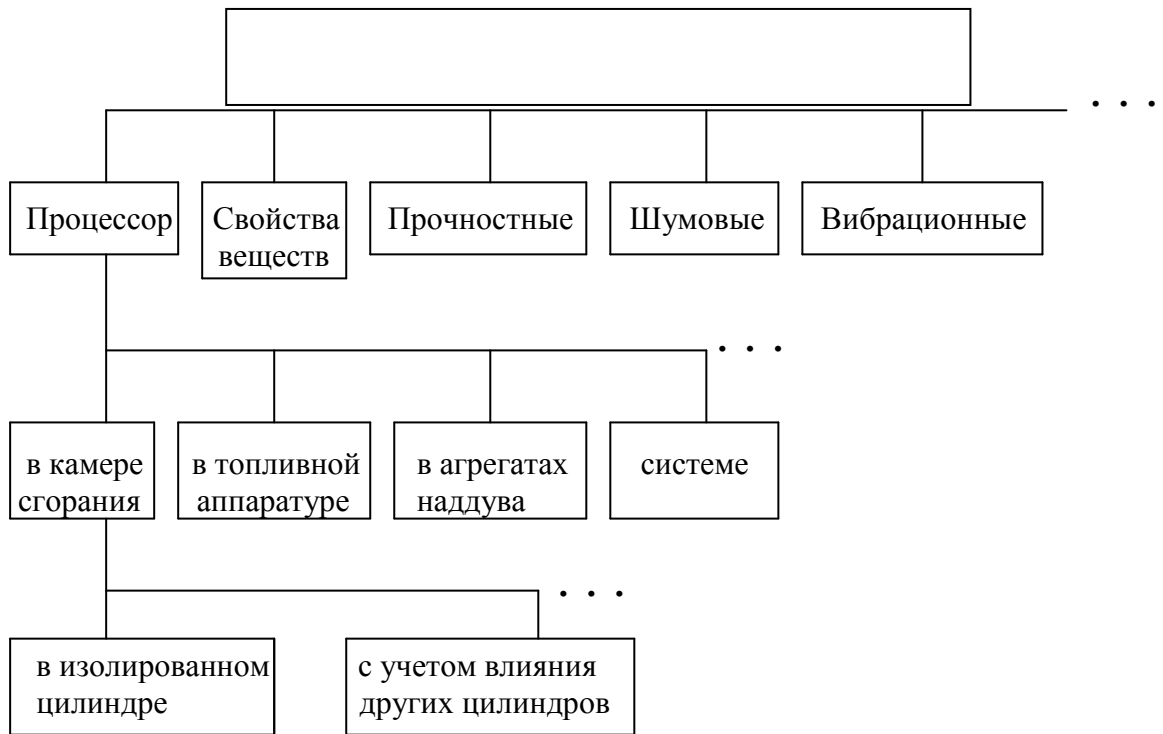


Рисунок 4.15. Система математических моделей на верхних уровнях иерархии

2. ПРАКТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

2.1 Перечень тем лабораторных занятий по дисциплине «Математическое моделирование производственных процессов»

1. Моделирование кинематической характеристики кривошипно– шатунного механизма ДВС.
2. Моделирование кинематической характеристики газораспределительного механизма.
3. Моделирование напряжённого состояния стержня.
4. Моделирование термодинамических циклов поршневых ДВС.
5. Моделирование термодинамических циклов газотурбинной установки и реактивных двигателей.
6. Моделирование теплопередачи в многослойной цилиндрической стенке.
7. Моделирование внешней скоростной характеристики поршневых ДВС.

2.2 Методические указания для выполнения лабораторных работ по дисциплине «Математическое моделирование производственных процессов»

Министерство образования Республики Беларусь
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра «Двигатели внутреннего сгорания»

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

Методические указания к лабораторным работам для студентов специальности
1-37.01.01 «Двигатели внутреннего сгорания»

Минск 2009

УДК 621.432.016.4:519.86(076.5)(075.8)

ББК 31.365я7

М 34

С о с т а в и т е л и :

В.А.Бармин, А.В.Предко

Р е ц е н з е н т ы :

Л.А.Молибошко, Д.В. Капский

Математическое моделирование производственных процессов: методические указания к лабораторным работам для студентов специальности 1-37.01.01 «Двигатели внутреннего сгорания» / сост.: В.А.Бармин, А.В.Предко. - Минск: БНТУ, 2009. - 30 с.

Методические указания к лабораторным работам по дисциплине «Математическое моделирование производственных процессов» для студентов специальности 1-37.01.01 «Двигатели внутреннего сгорания» содержат математические модели, которые относятся к различным классам и уровням. Приведенные модели позволяют моделировать кинематические и динамические характеристики кривошипно-шатунного и газораспределительного механизмов, напряженное состояние стрижней и балок, термодинамические циклы поршневых двигателей внутреннего сгорания, процессы передачи теплоты в многослойных стенках.

ВВЕДЕНИЕ

Проектирование и конструирование надежных и долговечных в эксплуатации машин, обладающих высокой экономичностью и малой материалоемкостью - основная задача в области машиностроения.

В двигателестроении решение этой задачи связано с оценкой теплового и напряженно-деформированного состояния элементов ДВС на этапе проектирования. Разработанные в 30-40 г.г. методы расчета деталей двигателя ориентированные на ручной счет, не в состоянии обеспечить требуемую точность результатов и не удовлетворяют технологии оптимального проектирования конструкции. Поэтому длительное время в основе проектирования лежали экспериментальные работы.

Создание и развитие вычислительной техники привело к разработке и внедрению в практику проектирования численных методов моделирования и оптимизации технических систем и процессов.

Оформление отчёта по лабораторной работе

Отчёт по лабораторной работе оформляется на стандартной белой бумаге формата А4 можно с двух сторон. Содержание отчёта распечатывается на печатающих и графических устройствах вывода ЭВМ, в соответствии с требованиями ГОСТ 7.32-2003 «Отчёт о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления.»

Структура отчёта должна включать следующие элементы:

1. Титульный лист.
2. Цель лабораторной работы.
3. Исходные данные для модели.
4. Математическое описание модели.
5. Блок-схема или описание алгоритма составления модели.
6. Преобразование математического описания модели в программу на алгоритмическом языке программирования или полное описание составления модели на одном из приложений Windows.
7. Результаты моделирования в виде таблицы.
8. Построение графиков зависимости $s_n(\varphi)$, $v_n(\varphi)$, $j_n(\varphi)$.
9. Анализ результатов моделирования.

КИНЕМАТИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА КРИВОШИПНО – ШАТУННОГО МЕХАНИЗМА ДВИГАТЕЛЯ

Цель работы: Моделирование кинематической характеристики кривошипно – шатунного механизма (КШМ) двигателя, построение диаграмм перемещения, скорости и ускорения поршня в зависимости от угла поворота коленчатого вала и их анализ.

Общие положения

При динамическом расчёте двигателя определяется кинематическая характеристика его кривошипно – шатунного механизма. Она позволяет провести кинематический анализ движения таких элементов КШМ, как поршень, шатун, кривошип. Уравнения, которые описывают движение этих элементов КШМ, дают возможность определить точное положение каждого элемента для любого угла поворота коленчатого вала. Особенно важным является положение поршня в цилиндре двигателя в зависимости от угла поворота коленчатого вала для расчёта рабочего процесса. Ускорение поршня и масса поршневой группы вместе с частью шатуна, совершающие возвратно – поступательное движение, формируют силу инерции, которые учитываются при прочностных расчётах движущихся деталей КШМ. Скорость поршня учитывается при расчётах проходных сечений горловин и клапанов в впускном и выпускном трактах двигателя при проектировании газораспределительного механизма, а также при движении газовых потоков. Ускорение и скорость поршня используются для прогнозирования срока службы двигателя. Диаметр цилиндра, ход поршня и радиус кривошипа влияют на компоновочно – габаритные размеры двигателя.

Математическая основа модели

Исходными данными для моделирования кинематической характеристики КШМ являются полный ход поршня S и выбранная конструктивная схема КШМ (центральный или смещённый КШМ). Центральный КШМ такой, в котором ось цилиндра пересекает ось коленчатого вала. При помощи этого механизма совершается передача работы газов в цилиндре двигателя на его колен-

чатый вал, и поступательное движение поршня преобразуется во вращательное движение вала. В смещённом КШМ ось цилиндра или поршневого пальца не пересекает ось коленчатого вала и смещена относительно её на некоторую величину a . Такой механизм называется *дезаксиальным*.

Для наиболее распространённого центрального КШМ основной кинематический параметр – радиус кривошипа – определяется как половина полного хода поршня ($R=S/2$). Значение другого, безразмерного геометрического параметра λ , представляющего отношение радиуса кривошипа R к длине шатуна $l_{ш}$ ($\lambda=R/l_{ш}$), обычно задают в пределах 0,24...0,31.

При моделировании используются следующие формулы:

угловая скорость вращения кривошипа (рад/с)

$$\omega = d\varphi / dt = \pi n / 30; \quad (1.1)$$

где φ – угол поворота кривошипа, отсчитываемый от положения, при котором поршень находится в верхней мёртвой точке (ВМТ), град ПКВ (поворота коленчатого вала); n – частота вращения коленчатого вала, мин⁻¹;

окружная скорость конца кривошипа (м/с)

$$u_k = R\omega; \quad (1.2)$$

центростремительное ускорение конца кривошипа (м/с²)

$$\varepsilon_k = R\omega^2; \quad (1.3)$$

перемещение s_n , скорость v_n и ускорение j_n поршня в центральном КШМ

$$s_i = R[(1 - \cos \varphi) + \frac{\lambda}{4}(1 - \cos 2\varphi)], \quad (1.4)$$

$$v_i = R\omega(\sin \varphi + \frac{\lambda}{2} \sin 2\varphi), \quad (1.5)$$

$$j_i = R\omega^2(\cos \varphi + \lambda \cos 2\varphi) \quad ; \quad (1.6)$$

перемещение, скорость и ускорение поршня в смещённом КШМ

$$s_i = R[(1 - \cos \varphi) + \frac{\lambda}{4}(1 - \cos 2\varphi) - k\lambda \sin \varphi], \quad (1.7)$$

$$v_i = R\omega(\sin \varphi + \frac{\lambda}{2} \sin 2\varphi - k\lambda \cos \varphi), \quad (1.8)$$

$$j_i = R\omega^2(\cos \varphi + \lambda \cos 2\varphi + k\lambda \sin \varphi), \quad (1.9)$$

где $k=a/R$ – относительное смещение (выбирается в пределах 0,05...0,15); a – смещение оси цилиндра или поршневого пальца от оси коленчатого вала.

Средняя скорость поршня (м/с)

$$v_{i\bar{\omega}} = \frac{S \cdot n}{30} = \frac{2}{\pi} R\omega \quad . \quad (1.10)$$

Максимальная скорость поршня (м/с)

$$v_{i\bar{\omega}\bar{\omega}} = R\omega\sqrt{1 + \lambda^2} \quad . \quad (1.11)$$

Для современных автотракторных двигателей средняя скорость поршня составляет 8...20 м/с, ускорение находится в пределах 5000...20000 м/с².

Обычно при рассмотрении кинематики КШМ считают, что угловая скорость вращения коленчатого вала ω постоянна и в расчётах принимается соответствующей частоте вращения его при максимальной мощности двигателя. Следовательно, угол поворота коленчатого вала пропорционален времени t . В действительности из-за неравномерности крутящего момента двигателя эта уг-

ловая скорость переменна, но изменяется в некоторых пределах, и это учитывается при определении крутильных колебаний системы коленчатого вала. В математической модели кинематики КШМ изменение угловой скорости вращения коленчатого вала не учитывается.

Математическая модель, для определения кинематических характеристик кривошипно – шатунного механизма двигателя, относится к детерминированным математическим моделям, так как существует жесткая кинематическая связь между подвижными элементами КШМ и геометрические параметры его неизменны в процессе решения задачи. Иными словами, каждому значению независимой входной переменной, которой является угол поворота коленчатого вала, соответствует вполне определённое значение выходной переменной (перемещение, скорость и ускорение поршня). При неизменных геометрических параметрах КШМ соответствие между значениями входной и выходной переменной в такой модели всегда будет однозначным, то есть определённым.

Методика разработки модели

Математическая модель, для определения кинематических характеристик кривошипно – шатунного механизма двигателя, может быть реализована на любом алгоритмическом языке программирования или в приложениях Windows для решения инженерных задач.

После получения от преподавателя исходных данных для составления модели, должен быть сформирован ввод исходных данных на компьютере с обязательной проверкой их правильности.

Составляется алгоритм расчёта и преобразуется математическое описание модели, приведенное выше, в математическую модель.

После получения модели, проводится тестирование и отладка компьютерной реализации модели.

Далее проводится расчёт на полученной модели, результаты которого выводятся в виде таблицы. Таблица должна содержать шапку из независимых и зависимых переменных с их размерностями. Значения перемещения, скорости и ускорения поршня выводятся от 0 до 360 градусов ПКВ с шагом 10 градусов. В формулах расчёта значения угла ПКВ подставляется в радианах. Полученные в таблице результаты используются для построения графиков зависимости $s_n(\varphi)$, $v_n(\varphi)$, $j_n(\varphi)$.

Графики зависимости $s_n(\varphi)$, $v_n(\varphi)$, $j_n(\varphi)$ строятся с помощью специальных программ, встроенных в алгоритмические языки программирования или в приложения Windows. По осям координат ставятся обозначения зависимых и независимых переменных, стрелками указывается направление их увеличения. Размерности зависимых и независимых переменных ставятся в место предпоследнего числа на осях координат. На графики наносится сетка. Значения переменных на осях координат напротив линий сетки определяются по результатам моделирования и наносятся с шагом кратным чётным числам или десяти.

Анализ результатов моделирования

Полученные результаты моделирования анализируются по характерным точкам зависимых переменных, соответствующим точкам пересечения с осями координат и точкам экстремума. Отмечаются также области, в которых зависимые переменные принимают отрицательные и положительные значения по углу ПКВ.

КИНЕМАТИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ГАЗОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОГО МЕХАНИЗМА ДВИГАТЕЛЯ

Цель работы: Моделирование кинематической характеристики газораспределительного механизма (ГРМ) двигателя, построение диаграмм перемещения, скорости и ускорения толкателя в зависимости от угла поворота распределительного вала и их анализ.

Общие положения

Динамический и прочностной расчёты газораспределительного механизма двигателя начинается с определения его кинематической характеристики. Она позволяет провести кинематический анализ движения таких элементов ГРМ, как толкатель и клапан. Уравнения, которые описывают движение этих элементов ГРМ, дают возможность определить точное положение каждого элемента для любого угла поворота распределительного вала. В двигателях современных автомобилей с увеличением частоты вращения коленчатого вала происходит значительное отклонение действительного движения клапана от движения, задаваемого профилем кулачка распределительного вала. Из-за инерционности деталей привода клапанного механизма и долгого времени колебаний клапанной пружины, происходит рассогласование движения клапана и толкателя. Это приводит к повышенной шумности работы двигателя, потери герметичности внутрицилиндрового пространства, значительным динамическим нагрузкам в деталях клапанного механизма и преждевременному износу деталей ГРМ. Особенно значительные нарушения нормальной работы ГРМ имеют место в двигателях с подвесными клапанами и нижним расположением распределительного вала. В таких клапанных механизмах указанные нарушения вызываются резкими изменениями сил инерции и недостаточной жесткостью деталей клапанного привода. В настоящее время в многооборотных двигателях применяют кулачки распределительного вала с профилем, построенным по заданному закону движения клапана. Такой закон обеспечивает плавный подъём клапана и безударную работу ГРМ. Поэтому кулачки, спрофилированные по этим законам, называются безударными. К числу таких кулачков, относятся кулачки спрофилированные по методу Курца и «полидайн».

Математическая основа модели

В основу математической модели, для моделирования кинематической характеристики движения толкателя, положен метод Курца. Для моделирования кинематической характеристики ГРМ исходными данными являются :

- диаметр цилиндра D ;
- площадь поршня $F_{п}$;
- частота вращения коленчатого вала двигателя при номинальной мощности n_N ;
- угловая скорость вращения коленчатого вала ω ;
- угловая скорость вращения распределительного вала (кулачка) $\omega_k = \omega / 2$;
- диаметр горловины $d_{гор}$;
- площадь проходного сечения клапана с коническим уплотнением $F_{кл}$,

Безударные кулачки проектируют в следующей последовательности:

1. Устанавливаются фазы газораспределения $\varphi_{i\delta}$, $\varphi_{c\bar{i}}$ и $\varphi_{\delta\bar{i}}$:

$\varphi_{i\delta}$ - угол предварения открытия впускного клапана, (град);

$\varphi_{c\bar{i}}$ - угол запаздывания впускного клапана, (град).

Величину угла $\varphi_{\delta\bar{i}}$ определяем в соответствии с выбранными фазами газораспределения

$$\varphi_{\delta\bar{i}} = \frac{(\varphi_{i\delta} + 180 + \varphi_{c\bar{i}})}{4}. \quad (2.1)$$

2. Определяется максимальная высота подъема клапана $h_{кл,max}$ и толкателя $h_{T,max}$, (мм):

$$h_{\bar{e}\bar{e}i\ \bar{a}x} = \frac{\sqrt{4,93d_{\bar{a}\delta}^2 + 4,44F_{\bar{e}\bar{e}}}}{2,22} - d_{\bar{a}\delta}, \quad (2.2)$$

$$h_{\dot{O}max} = h_{\bar{e}\bar{e}i\ \bar{a}x} \frac{l_{\dot{O}}}{l_{\bar{e}\bar{e}}}, \quad (2.3)$$

где l_T и $l_{кл}$ - длина плеч коромысла, прилегающих соответственно к толкателю и клапану.

Определяется закон изменения ускорения толкателя, обеспечивающий положительные ускорения, не превышающие 1500...3500, и отрицательные, не превышающие 500...1500 м/с².

3. Задаемся начальной окружностью радиусом r_0 :

$$r_0 = (3...4)h_{\bar{e}\bar{e}i\ \bar{a}x}. \quad (2.4)$$

Для обеспечения зазора в клапанном механизме тыльная часть кулачка выполняется радиусом r_k , меньшим радиуса r_0 на величину зазора Δs .

$$r_e = r_0 - \Delta s. \quad (2.5)$$

Величина Δs включает в себя температурный зазор и упругие деформации механизма газораспределения. Для выпускных клапанов $\Delta s = (0,35 \dots 0,45) i \dot{i}$. Для впускных клапанов $\Delta s = (0,25 \dots 0,35) i \dot{i}$.

4. Определяется положение точек начала открытия A и конца закрытия A' клапана в соответствии с принятым углом $\varphi_{\delta i}$.

5. Откладываются углы φ_{K0} , соответствующие выбору зазора на участках набегания и сбегания (участок сбегания — Φ_0 , рад):

$$\hat{O}_0 = \frac{\pi^2 \Delta s}{2 \cdot 180 \cdot \omega'_{\delta 0 \dot{E}}}, \quad (2.6)$$

где ω'_{T0K} - скорость толкателя в конце сбегания, мм/град, $\omega'_{T0K} = (0,008 \dots 0,022)$.

6. Проводятся из центра O через $0,5^\circ$ (или $1 \dots 2^\circ$ в зависимости от точности построения) радиальные лучи OO , $O1$, $O2$.

7. Откладываются на проведенных лучах от окружности радиуса r_k величины подъемов толкателя (с учетом выбора зазора Δs) $a_1 b_1, a_2 b_2, \dots, a_i b_i, a_{i+1} b_{i+1}, \dots$

8. Восстанавливаются перпендикуляры к радиальным лучам из точек $b_1, b_2, \dots, b_i, b_i, \dots$ в сторону оси симметрии кулачка.

9. Проводятся к восстановленным перпендикулярам огибающую, которая и будет искомым профилем безударного кулачка. В зависимости от требований, предъявляемых к ГРМ, безударные кулачки можно проектировать с учетом или без учета упругости деталей привода клапана.

К числу кулачков, проектируемых без учета упругости деталей ГРМ, относится кулачок, спроектированный на основе закона изменения ускорения по методу Курца, приведенного на рисунке 2.1. Графики ускорений этого кулачка состоят из четырех участков:

- 1) сбегания Φ_0 — косинусоида;
- 2) положительных ускорений Φ_1 — половина волны синусоиды;
- 3) первого участка отрицательных ускорений Φ_2 — четверть волны синусоиды;
- 4) второго участка отрицательных ускорений Φ_3 — отрезок параболы.

Угловую протяженность Φ_1 , Φ_2 и Φ_3 различных участков ускорения толкателя рекомендуется выбирать из соотношений:

$$\hat{O}_1 + \hat{O}_2 + \hat{O}_3 = \left(\frac{\pi}{180} \right) \varphi_{\hat{O}i}, \quad (2.7)$$

$$\hat{O}_2 = (0, 10 \dots 0, 25) \hat{O}_3, \quad (2.8)$$

$$\hat{O}_2 + \hat{O}_3 = (1, 5 \dots 3, 0) \hat{O}_1. \quad (2.9)$$

Выражения для пути, скорости и ускорения толкателя при безударном кулачке для различных участков профиля кулачка:

- участок сбегу кулачка ($0 \leq \varphi_K = \varphi_{K0} \leq \Phi_0$),

где $\varphi_{K0} = 0 \dots \Phi_0$.

$$\left. \begin{aligned} h_0 &= \Delta s \left(1 - \cos \frac{\pi}{2\hat{O}_0} \varphi_{\hat{E}i} \right) \\ \omega_{\dot{O}0} &= \Delta s \omega_K \frac{\pi}{2\hat{O}_0} \sin \frac{\pi}{2\hat{O}_0} \varphi_{\hat{E}i}; \\ j_{\ddot{O}0} &= \Delta s \omega_K^2 \left(\frac{\pi}{2\hat{O}_0} \right)^2 \cos \frac{\pi}{2\hat{O}_0} \varphi_{\hat{E}i}. \end{aligned} \right\}; \quad (2.10)$$

- участок положительных ускорений ($0 \leq \varphi_K = \varphi_{K1} \leq \Phi_1$),

где $\varphi_{K1} = 0 \dots \Phi_1$.

$$\left. \begin{aligned} h_1 &= \Delta s + \tilde{n}_{11} \varphi_{\hat{E}1} - \tilde{n}_{12} \sin \frac{\pi}{\hat{O}_1} \varphi_{\hat{E}1}; \\ \omega_{\dot{O}1} &= \omega_K \left(\tilde{n}_{11} - \tilde{n}_{12} \frac{\pi}{\hat{O}_1} \cos \frac{\pi}{\hat{O}_1} \varphi_{\hat{E}1} \right); \\ j_{\ddot{O}1} &= \omega_{\hat{E}}^2 \left[\tilde{n}_{12} \left(\frac{\pi}{\hat{O}_1} \right)^2 \sin \frac{\pi}{\hat{O}_1} \varphi_{\hat{E}1} \right]. \end{aligned} \right\}; \quad (2.11)$$

- первый участок отрицательных ускорений ($0 \leq \varphi_{\hat{E}} = \varphi_{\hat{E}2} \leq \hat{O}_2$),

где $\varphi_{\hat{E}2} = 0 \dots \Phi_2$.

$$\left. \begin{aligned} h_2 &= h_{1K} + \tilde{n}_{21}\varphi_{\hat{E}2} + \tilde{n}_{22} \sin \frac{\pi}{2\hat{O}_2} \varphi_{\hat{E}2}; \\ h_{1K} &= \Delta s + c_{11}\hat{O}_1; \\ \omega_{\hat{O}2} &= \omega_K (\tilde{n}_{21} + \tilde{n}_{22} \frac{\pi}{2\hat{O}_2} \cos \frac{\pi}{2\hat{O}_2} \varphi_{\hat{E}2}); \\ j_{\hat{O}2} &= \omega_{\hat{E}}^2 \left[-\tilde{n}_{22} \left(\frac{\pi}{2\hat{O}_2} \right)^2 \sin \frac{\pi}{2\hat{O}_2} \varphi_{\hat{E}2} \right]. \end{aligned} \right\} \quad (2.12)$$

- второй участок отрицательных ускорений ($0 \leq \varphi_{\hat{E}} = \varphi_{\hat{E}3} \leq \hat{O}_3$),
где $\varphi_{\hat{E}3} = 0 \dots \Phi_3$.

$$\left. \begin{aligned} h_3 &= h_{2K} + c_{31}(\hat{O}_3 - \varphi_{\hat{E}3})^4 - c_{32}(\hat{O}_3 - \varphi_{\hat{E}3})^2 + \tilde{n}_{33}; \\ h_{2K} &= \Delta s + c_{11}\hat{O}_1 + c_{21}\hat{O}_2 + \tilde{n}_{22}; \\ \omega_{\hat{O}3} &= \omega_K \left[-4c_{31}(\hat{O}_3 - \varphi_{\hat{E}3})^3 + 2c_{32}(\hat{O}_3 - \varphi_{\hat{E}3}) \right]; \\ j_{\hat{O}3} &= \omega_{\hat{E}}^2 \left[12c_{31}(\hat{O}_3 - \varphi_{\hat{E}3})^2 - 2c_{32} \right] \end{aligned} \right\} \quad (2.13)$$

где ω_K - угловая скорость вращения распределительного вала, рад/с;

$\varphi_{\hat{E}}$ - текущее значение угла поворота кулачка, град;

$\varphi_{\hat{E}0}, \varphi_{\hat{E}1}, \varphi_{\hat{E}2}, \varphi_{\hat{E}3}$ - текущие значения угла поворота кулачка от начала соответствующего участка профиля кулачка до конца участка (значения, не находящиеся под знаком тригонометрических функций, выражены в радианах, в остальных случаях – в градусах);

Φ_0, Φ_1, Φ_2 и Φ_3 - угловые интервалы соответствующих участков ускорения толкателя, рад;

h_0, h_1, h_2, h_3 - текущие перемещения толкателя на соответствующих участках профиля кулачка, мм;

$\omega_{T0}, \omega_{T1}, \omega_{T2}, \omega_{T3}$ - скорости толкателя на соответствующих участках профиля кулачка, мм/с;

ω_{T0K}'' - скорость толкателя в конце участка сбег, мм/рад;

$j_{T0}, j_{T1}, j_{T2}, j_{T3}$ - ускорения толкателя на соответствующих участках профиля кулачка, мм/с²;

$h_{iH}, \omega_{TiH}, j_{TiH}, \varphi_{KiH}$ - путь, скорость, ускорение толкателя и угол поворота кулачка в начале соответствующего участка;

$h_{iK}, \omega_{TiK}, j_{TiK}, \varphi_{KiK}$ - путь, скорость, ускорение толкателя и угол поворота кулачка в конце соответствующего участка;

$c_{11}, c_{12}, c_{21}, c_{22}, c_{31}, c_{32}, c_{33}$ - коэффициенты закона движения толкателя, определяемые из равенства перемещений, скоростей и ускорений на границах участков по системе уравнений:

$$h_{3\hat{E}} = h_{\hat{O}_{\max}} + \Delta s, \quad (2.14)$$

$$\tilde{n}_{11}\hat{O}_1 + \tilde{n}_{21}\hat{O}_2 + \tilde{n}_{22} + \tilde{n}_{33} - h_{\hat{O}_{\max}} = 0, \quad (2.15)$$

$$h_{3i} = h_{2\hat{E}}, \quad (2.16)$$

$$\tilde{n}_{31}\hat{O}_3^4 - \tilde{n}_{32}\hat{O}_3^2 + \tilde{n}_{33} = 0, \quad (2.17)$$

$$\omega_{\hat{O}1i} = \omega_{\hat{O}0\hat{E}}, \quad (2.18)$$

$$\tilde{n}_{11} - \frac{\tilde{n}_{12}\pi}{\hat{O}_1} - \omega_{\hat{O}0\hat{E}}'' = 0, \quad (2.19)$$

$$\omega_{\hat{O}2i} = \omega_{\hat{O}1\hat{E}}, \quad (2.20)$$

$$\tilde{n}_{11} + \frac{\tilde{n}_{12}\pi}{\hat{O}_1} - \tilde{n}_{21} - \frac{\tilde{n}_{22}\pi}{2\hat{O}_2} = 0, \quad (2.21)$$

$$\omega_{\hat{O}3i} = \omega_{\hat{O}2\hat{E}}, \quad (2.22)$$

$$\tilde{n}_{21} + 4\tilde{n}_{31}\hat{O}_3^3 - 2\tilde{n}_{32}\hat{O}_3 = 0, \quad (2.23)$$

$$j_{\hat{O}3i} = j_{\hat{O}2\hat{E}}, \quad (2.24)$$

$$\tilde{n}_{22} \left(\frac{\pi}{2\hat{O}_2} \right)^2 + 12\tilde{n}_{31}\hat{O}_3^2 - 2\tilde{n}_{32} = 0. \quad (2.25)$$

Так как уравнений только шесть, а коэффициентов семь, добавляется ещё одна зависимость, характеризующая форму отрицательной части кривой ускорения:

$$j_{T2K} / j_{T3K} = Z \quad (2.26)$$

Для кулачка Курца рекомендуется $Z = 5/8$.

Принимая для сокращения записи обозначения

$$k_1 = 8Z \left(\frac{\hat{O}_2}{\pi} \right)^2, \quad (2.27)$$

$$k_2 = \frac{5+Z}{6} \hat{O}_3^2, \quad (2.28)$$

$$k_3 = \frac{4+2Z}{3} \Phi_3, \quad (2.29)$$

$$K_1 = k_1 + k_2 + k_3 \hat{O}_2, \quad (2.30)$$

$$K_2 = k_3 + 4Z \frac{\hat{O}_2}{\pi}, \quad (2.31)$$

получаем окончательную систему уравнений для определения семи коэффициентов закона движения толкателя

$$\tilde{n}_{11} = \frac{\hat{E}_1 \omega''_{\hat{O}_0 \hat{E}} + \hat{E}_2 h_{\hat{O}_{\max}}}{2\hat{E}_1 + \hat{E}_2 \hat{O}_1}, \quad (2.32)$$

где $\omega''_{\hat{O}_0 \hat{E}}$ - скорость толкателя в конце сбega, мм/рад.

$$\omega''_{\hat{O}_0 \hat{E}} = \omega'_{\hat{O}_0 \hat{E}} \frac{180}{\pi}, \quad (2.33)$$

$$\tilde{n}_{12} = \left(\tilde{n}_{11} - \omega''_{\hat{O}_0 \hat{E}} \right) \frac{\hat{O}_1}{\pi}, \quad (2.34)$$

$$\tilde{n}_{32} = \frac{\left(2\tilde{n}_{11} - \omega''_{\hat{O}_0 \hat{E}} \right)}{K_2}, \quad (2.35)$$

$$\tilde{n}_{21} = \tilde{n}_{32} k_3 \quad (2.36)$$

$$\tilde{n}_{22} = \tilde{n}_{32} k_1, \quad (2.37)$$

$$\tilde{n}_{31} = \tilde{n}_{32} \frac{1-Z}{6\hat{O}_3^2}, \quad (2.38)$$

$$\tilde{n}_{33} = \tilde{n}_{32} k_2. \quad (2.39)$$

Проверяются значения вычисленных коэффициентов:

$$\tilde{n}_{11} \hat{O}_1 + \tilde{n}_{21} \hat{O}_2 + \tilde{n}_{22} + \tilde{n}_{33} - h_{\hat{O}_{\max}} = 0 \quad (2.40)$$

$$\tilde{n}_{31} \hat{O}_3^4 - \tilde{n}_{32} \hat{O}_3^2 + \tilde{n}_{33} = 0 \quad (2.41)$$

$$\tilde{n}_{11} - \frac{\tilde{n}_{12} \pi}{\hat{O}_1} - \omega''_{\hat{O}_0 \hat{E}} = 0 \quad (2.42)$$

$$\tilde{n}_{11} + \frac{\tilde{n}_{12} \pi}{\hat{O}_1} - \tilde{n}_{21} - \frac{\tilde{n}_{22} \pi}{2\hat{O}_2} = 0 \quad (2.43)$$

$$\tilde{n}_{21} + 4\tilde{n}_{31} \hat{O}_3^3 - 2\tilde{n}_{32} \hat{O}_3 = 0 \quad (2.44)$$

$$\tilde{n}_{22} \left(\frac{\pi}{2\hat{O}_2} \right)^2 + 12\tilde{n}_{31} \hat{O}_3^2 - 2\tilde{n}_{32} = 0 \quad (2.45)$$

Несовпадение величин перемещений и скоростей в точках перехода одного участка в другой не должны превышать 0,0001, а ускорений – 0,001.

После вычисления коэффициентов рассчитываются по формулам (2.10) – (2.13) перемещения, скорости и ускорения толкателя, а так же характерные для кинематики толкателя величины.

Максимальная скорость толкателя (мм/с)

$$\omega_{T \max} = \omega_K (c_{11} + c_{12} \pi / \Phi_1) = \omega_K (c_{21} + c_{22} \pi / 2\Phi_1) = \omega_K K_2 c_{32} \quad (2.46)$$

Максимальное и минимальное ускорение толкателя (мм/с²)

$$\begin{aligned} j_{T \max} &= \omega_K^2 c_{12} (\pi / \Phi_1)^2; \\ j_{T \min} &= -\omega_K^2 2c_{32}. \end{aligned} \quad (2.47)$$

Расчет производится при помощи ЭВМ. Результаты расчета сводятся в таблицу.

По результатам, приведенным в таблице, строятся диаграммы подъема (перемещения), скорости и ускорений толкателя при движении по безударному кулачку в зависимости от угла поворота распределительного вала. Эти же диаграммы, но в масштабе, изменённом на величину l_k/l_t , являются диаграммами подъёма, скорости и ускорения клапана.

ПРОФИЛИРОВАНИЕ СТЕРЖНЕЙ И БАЛОК РАВНОЙ ПРОЧНОСТИ

Цель работы: Изучение методов моделирования напряженного состояния стержней при растяжении-сжатии и балок при изгибе с использованием одномерных конечных элементов. Построение математической модели профилирования стержней и балок равной прочности и расчет профилей равнопрочных стержней и балок.

Общие положения

При расчете деталей на прочность в машиностроении собственный вес конструкции обычно не учитывается. Возникает вопрос, не вносится ли этим упрощением расчета слишком большая погрешность?

Рассмотрим случай растяжения вертикального стержня (рисунок 3.1, а) закреплен своим верхним концом; к нижнему его концу подвешен груз P . Длина стержня l , площадь поперечного сечения F , плотность материала ρ и модуль упругости E . Подсчитаем напряжения по сечению АВ, расположенному на расстоянии x от свободного конца стержня.

Рассечем стержень сечением АВ и выделим нижнюю часть длиной x с приложенными к ней внешними силами (рисунок 3.1, б) - грузом P и ее собственным весом ρFx . Эти две силы уравновешиваются напряжениями, действующими на площадь АВ от отброшенной части. Эти напряжения будут нормальными, равномерно распределенными по сечению и направленными наружу от рассматриваемой части стержня, т. е. растягивающими. Величина их будет равна:

$$\sigma(x) = \frac{P + \rho Fx}{F} = \frac{P}{F} + \rho x.$$

Таким образом, при учете собственного веса нормальные напряжения оказываются неодинаковыми во всех сечениях. Наиболее напряженным, опасным, будет верхнее сечение, для которого x достигает наибольшего значения l ; напряжение в нем равно:

$$\sigma_{\max} = \frac{P}{F} + \rho l.$$

Условие прочности должно быть выполнено именно для этого сечения:

$$\sigma_{max} = \frac{P}{F} + \rho l \leq [\sigma].$$

Отсюда необходимая площадь стержня равна:

$$F \geq \frac{P}{[\sigma] - \rho l}.$$

От формулы, определяющей площадь растянутого стержня без учета влияния собственного веса, эта формула отличается лишь тем, что из допускаемого напряжения вычитается величина ρl .

Чтобы оценить значение этой поправки, подсчитаем ее для двух случаев. Возьмем стержень из стали длиной 10 м; для него $[\sigma] = 140 \text{ МПа}$, а величина

$\rho l = 78,5 \frac{\text{МПа}}{\text{м}^2}$. Таким образом, для стержня из мягкой стали поправка составит $\frac{78,5}{140}$ т. е. около 0,6%. Теперь возьмем кирпичный столб высотой тоже 10 м; для

него $[\sigma] = 1,2 \text{ МПа}$, а величина $\rho l = 18 \frac{\text{МПа}}{\text{м}^2}$. Таким образом, для кирпичного столба поправка составит $\frac{18}{1,2}$, т.е. уже 15%.

Вполне понятно, что влиянием собственного веса при растяжении и сжатии стержней можно пренебрегать, если мы не имеем дела с длинными стержнями или со стержнями из материала, обладающего сравнительно небольшой прочностью при достаточном весе. При расчете длинных канатов подъемников, различного рода длинных штанг приходится вводить в расчет и собственный вес конструкции.

В таких случаях возникает вопрос о целесообразной форме стержня. Если мы подберем сечение стержня так, что дадим одну и ту же площадь поперечного сечения по всей длине, то материал стержня будет плохо использован; нормальное напряжение в нем дойдет до допускаемого лишь в одном верхнем сечении; во всех прочих сечениях мы будем иметь запас в напряжениях, т. е. излишний материал. Поэтому желательно так запроектировать размеры стержня, чтобы во всех его поперечных сечениях (перпендикулярных к оси) нормальные напряжения были постоянны,

Такой стержень называется стержнем равного сопротивления растяжению или сжатию. Если при этом напряжения равны допусковым, то такой стержень будет иметь наименьший вес.

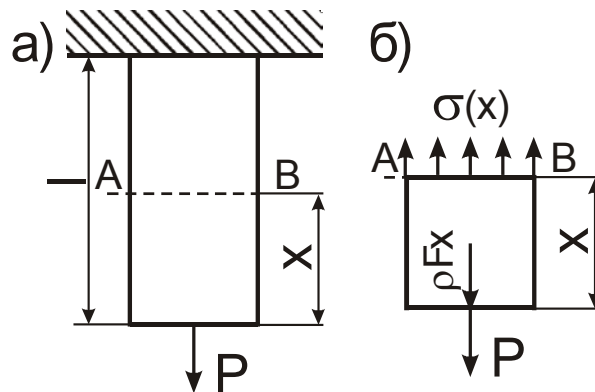


Рисунок 3.1 – Расчет стержня на растяжение с учетом собственной массы

Основные физико-математические зависимости

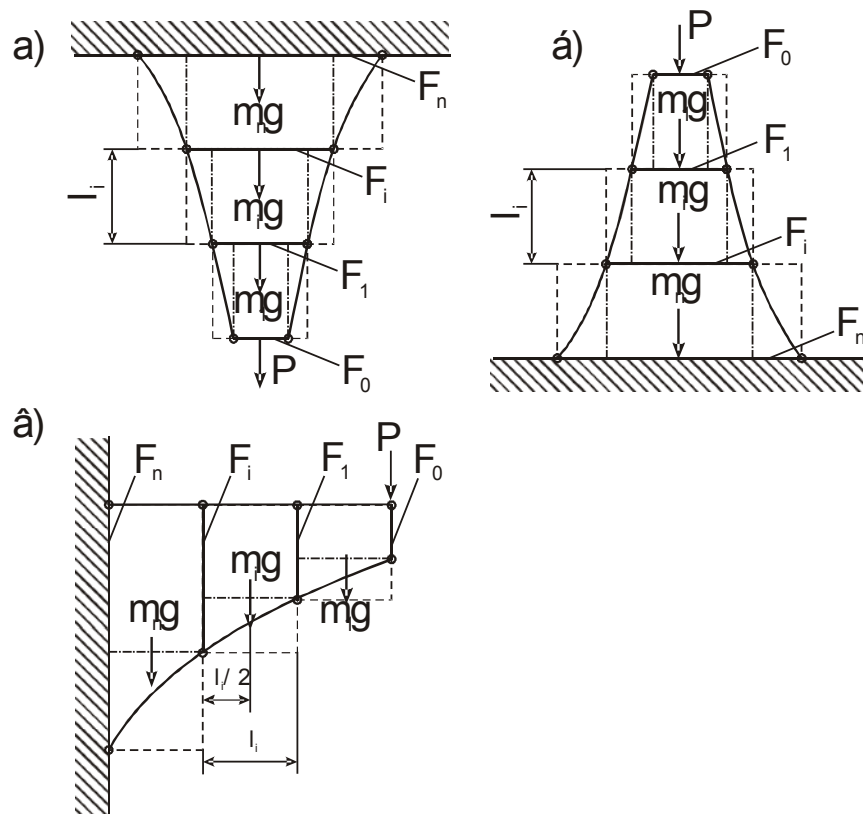


Рисунок 3.2 – Схемы нагружения

а – растяжение, б – сжатие, в – изгиб,

----- – недостаточная прочность, - - - - - – избыточная прочность

Масса i -го элемента

$$m_i = \rho \cdot F_i \cdot l_i,$$

где ρ – плотность материала; F_i – площадь сечения; l_i – длина элемента.

Нагрузка растяжения (сжатия) в i -ом сечении

$$P_i = P_{i-1} + m_i g.$$

Напряжения, возникающие при растяжении сжатии стержня

$$\sigma_{\delta i} = \frac{P_i}{F_i}.$$

Изгибающий момент в i -ом сечении балки

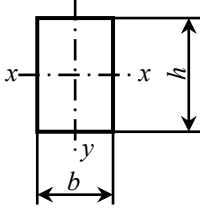
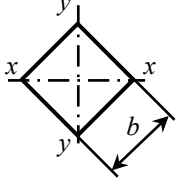
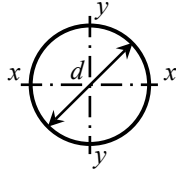
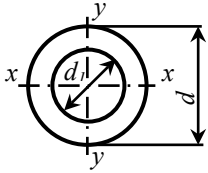
$$M_i = P \cdot i \cdot l_i + \sum_{j=1}^i \left(\frac{l_j}{2} + \sum_{k=1}^{j-1} l_k \right) \cdot m_j g.$$

Напряжения, возникающие при изгибе

$$\sigma_{\epsilon i} = \frac{M_i}{W_i},$$

где W_i – момент сопротивления сечения на изгиб (таблица 3.1).

Таблица 3.1 – Моменты сопротивления изгибу различных сечений

	Форма сечения	Моменты сопротивления изгибу
1		$W_x = \frac{b \cdot h^2}{6};$ $W_y = \frac{b^2 \cdot h}{6}$
2		$W_x = W_y = \frac{b^3 \sqrt{2}}{12}$
3		$W_x = W_y = \frac{\pi \cdot d^3}{32}$
4		$W_x = W_y = \frac{\pi}{32} \cdot \frac{d^4 - d_1^4}{d}$

Методика разработки модели

На первом этапе построения модели стержень (балка) разбивается на n -ое число отрезков, представляющих собой линейные конечные элементы. Граничными условиями на входе и выходе элемента является нормальное напряжение, причем напряжение на выходе одного элемента должно равняться напряжению на входе в другой.

Расчет ведется с наименее нагруженного сечения. Профиль балки недостаточной прочности определяется без учета собственного веса расчетного элемента, профиль избыточной прочности рассчитывается из условия постоянства сечения и с учетом собственного веса элемента.

Математическая модель нагруженного состояния стержня (балки), может быть реализована на любом алгоритмическом языке программирования или в приложениях Windows для решения инженерных задач.

Исходные данные берутся из таблиц 3.2, 3.3 согласно варианту.

Математическое описание модели преобразуется, в математическую модель. При необходимости используются численные методы.

Составляется алгоритм реализации модели и программа расчета. Программа должна содержать блок ввода исходных данных, расчетный блок и блок вывода результатов моделирования. Результаты представляются в виде таблиц и графиков.

После составления программы модели, проводится тестирование и отладка.

Анализ результатов моделирования

Полученные результаты моделирования анализируются по значениям коэффициентов запаса прочности определяемые как отношение допустимого напряжения к действующему

$$K_i = \frac{[\sigma]}{\sigma_i}.$$

Сравнить массы стержней (балок) различных вариантов.

Сделать выводы о целесообразности расчета профилей стержней (балок) равной прочности.

Таблица 3.2 – Исходные данные для моделирования напряженного состояния

Вариант	Нагрузка Р, кН	Длина стержня (балки) l, м	Плотность материала ρ, кг/м ³	Предельное допустимое напряжение [σ], МПа	Форма сече- ния (для из- гиба)
1.	20	1,2	7800	250	1
2.	15	2,0	7600	190	2
3.	5,0	3,2	8300	70	3
4.	22	4,8	2200	55	4
5.	16	3,2	7400	120	1
6.	30	10	1200	1,5	2
7.	25	15	2500	2,3	3
8.	32	7	6100	20,6	4
9.	40	22	5300	12	3
10.	12	3,2	6800	160	2

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ЦИКЛОВ ПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Цель работы: Изучение методов моделирования термодинамических процессов. Построение математической модели термодинамических циклов поршневых двигателей внутреннего сгорания (ДВС) с целью определения параметров состояния рабочего тела в характерных точках, величин работ сжатия, расширения и полезной работы, количества подведенной и отведенной теплоты, термического коэффициента полезного действия.

Общие положения

Двигатель внутреннего сгорания осуществляет преобразование тепловой энергии, полученной при сгорании топлива, в механическую работу. Этот процесс совершается при помощи рабочего тела - газов, которые при работе двигателя претерпевают изменения своего состояния. Последовательно протекающая совокупность изменений состояния рабочего тела (процессов), в результате которой оно обретает свое первоначальное термодинамическое состояние, называется рабочим циклом двигателя внутреннего сгорания.

В теоретическом цикле в отличие от действительного отсутствуют потери тепла, за исключением неизбежной отдачи тепла холодному источнику, без которой, согласно второму закону термодинамики, невозможно превращение в двигателе тепла в работу. Теоретический цикл осуществляется при соблюдении следующих условий:

1. Цикл является замкнутым (обратимым) и протекает с постоянным количеством одного и того же рабочего тела.
2. Теплоемкость рабочего тела на протяжении всего цикла считается постоянной, не зависящей от температуры.
3. В цилиндре двигателя не происходит сгорания топлива, а имеет место подвод тепла извне.
4. Процессы сжатия и расширения протекают по адиабатическому закону, т. е. без теплообмена с внешней средой.

По типу подвода теплоты различают следующие термодинамические циклы ДВС (рисунок 4.1):

- а) цикл с подводом тепла при постоянном объеме - $V = \text{const}$ (цикл Отто);

б) цикл с подводом тепла при постоянном давлении - $p = \text{const}$ (цикл Дизеля);

в) цикл с подводом тепла при постоянных объеме и давлении - $V = \text{const}$ и $p = \text{const}$ (цикл Тринклера)

Во всех трех циклах отвод тепла осуществляется при постоянном объеме.

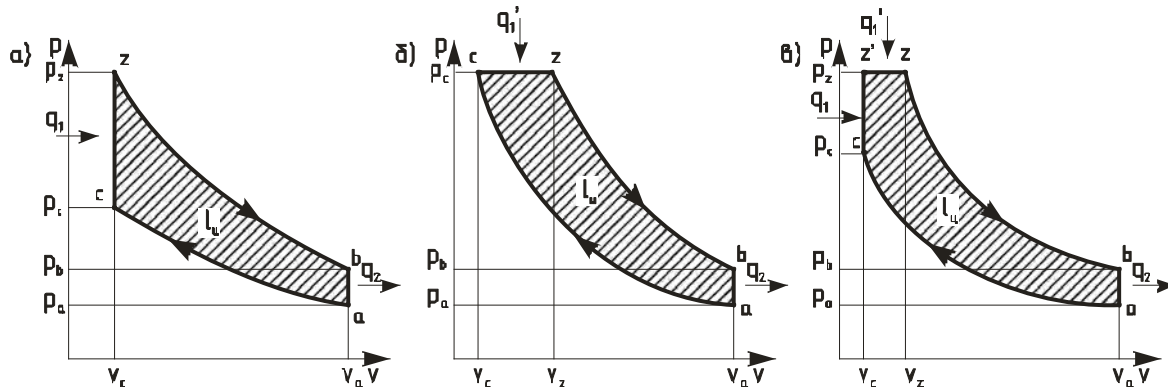


Рисунок 4.1 – Термодинамические циклы поршневых ДВС
а – цикл Отто, б – цикл Дизеля, в – цикл Тринклера

Основные физико-математические зависимости

Введем следующие обозначения безразмерных параметров циклов (рисунок 4.1):

$$\text{степень сжатия } \varepsilon = \frac{V_a}{V_c};$$

$$\text{степень предварительного расширения } \rho = \frac{V_z}{V_c};$$

$$\text{степень последующего расширения } \delta = \frac{V_a}{V_z};$$

$$\text{степень повышения давления } \lambda = \frac{p_z}{p_c}.$$

Процессы сжатия и расширения описываются уравнением адиабаты :

$$pV^k = \text{const},$$

где k — показатель адиабаты. Для идеального газа $k = \frac{c_p}{c_v}$, где c_p , c_v - удельные

теплоемкости для изобарного и изохорного процессов, для воздуха $k=1,41$.

Работа, затраченная в процессе сжатия

$$L_{ac} = \int_a^c p(V) dV.$$

Работа, совершенная рабочим телом в процессе расширения

$$L_{zb} = \int_z^b p(V) dV.$$

Полезная работа термодинамического цикла

$$L_{\dot{o}} = L_{zb} + L_{ac}.$$

Количество теплоты, подведенное в изохорном процессе

$$Q_1 = c_v \cdot m \cdot (T_{z(z')} - T_c),$$

где m – масса газа, T_z и T_c – температура газа в соответствующих точках цикла.

Количество теплоты, подведенное в изобарном процессе

$$Q_1' = c_p \cdot m \cdot (T_z - T_{z'}).$$

Суммарное количество теплоты, подведенное к рабочему телу

$$\sum Q_1 = Q_1 + Q_1'.$$

Количество теплоты, отведенное в изохорном процессе

$$Q_2 = c_v \cdot m \cdot (T_a - T_b).$$

Термический КПД цикла определяется зависимостью

$$\eta_t = \frac{\sum Q_1 - Q_2}{Q_2}.$$

Для определения неизвестных параметров состояния рабочего тела в расчетных точках необходимо использовать уравнение состояния идеального газа (уравнение Клапейрона)

$$p \cdot V = m \cdot R \cdot T,$$

где R – газовая постоянная, для воздуха $R=287$ Дж/(кг·К).

Методика разработки модели

Математическая модель термодинамических циклов поршневых ДВС, может быть реализована на любом алгоритмическом языке программирования или в приложениях Windows для решения инженерных задач.

Исходные данные берутся из таблиц 4.1, 4.2 согласно варианту.

Математическое описание модели преобразуется, в математическую модель. При необходимости используются численные методы.

Составляется алгоритм реализации модели и программа расчета. Программа должна содержать блок ввода исходных данных, расчетный блок и блок вывода результатов моделирования. Результаты представляются в виде таблиц и графиков.

После составления программы модели, проводится тестирование и отладка.

Анализ результатов моделирования

Полученные результаты моделирования анализируются по значениям параметров состояния рабочего тела в характерных точках, величин затраченной работы на сжатие, совершенной работы при расширении, полезной работы цикла, количеств подведенной и отведенной теплоты, термического КПД цикла.

Контрольные значения термических КПД определяются по следующим зависимостям:

$$\text{для цикла Отто } \eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}};$$

$$\text{для цикла Дизеля } \eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \cdot \frac{\rho^k - 1}{k \cdot (\rho - 1)};$$

$$\text{для цикла Тринклера } \eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \cdot \frac{\lambda \cdot \rho^k - 1}{(\lambda - 1) + k \cdot \lambda \cdot (\rho - 1)}.$$

Таблица 4.1 – Исходные данные для моделирования циклов Отто и Дизеля

Вариант	Начальные параметры состояния рабочего тела			Степень сжатия ϵ	Степень повышения давления λ	Степень предварительного расширения ρ
	P_a , МПа	T_a , К	V_a , л			
11.	0,110	300	0,25	11	3,2	1
12.	0,100	293	0,30	10	3,0	1
13.	0,095	288	0,40	9	2,8	1
14.	0,090	305	0,45	8	2,4	1
15.	0,085	310	0,50	7	2,0	1
16.	0,170	318	1,75	15	1	1,8
17.	0,150	310	1,50	17	1	2,0
18.	0,120	300	1,25	19	1	2,2
19.	0,100	293	1,00	21	1	2,0
20.	0,098	305	0,75	23	1	1,8

Таблица 4.2 – Исходные данные для моделирования цикла Тринклера

Вариант	Начальные параметры состояния рабочего тела			Степень сжатия ϵ	Степень повышения давления λ	Степень предварительного расширения ρ
	P_a , МПа	T_a , К	V_a , л			
1.	0,085	300	0,50	23	1,8	1,50
2.	0,088	295	0,60	20	2,0	1,45
3.	0,090	300	0,80	19	2,2	1,40
4.	0,092	305	1,00	18	2,4	1,25
5.	0,095	310	1,12	17	2,6	1,20
6.	0,100	293	1,25	16	2,4	1,15
7.	0,125	300	1,12	17	2,2	1,25
8.	0,150	310	1,00	18	2,0	1,40
9.	0,170	318	0,80	16	1,8	1,55
10.	0,200	320	0,50	15	1,6	1,7

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ЧЕРЕЗ МНОГОСЛОЙНЫЕ СТЕНКИ

Цель работы: Изучение методов моделирования передачи теплоты в телах простой геометрической формы. Построение конечно-разностных математических моделей передачи теплоты в многослойных стенках с целью определения закона распределения температур.

Общие положения

Основным условием распространения теплоты в пространстве является наличие разности температур в различных его точках. В случае передачи теплоты теплопроводностью необходимым условием является неравенство нулю температурного градиента в различных точках тела.

Основным законом передачи теплоты теплопроводностью является закон Фурье, согласно которому элементарное количество теплоты dQ_τ , проходящей через элементарную площадь изотермической поверхности dF за элементарный промежуток времени $d\tau$, пропорционально температурному градиенту $(\partial T/\partial n)$:

$$dQ_\tau = -\lambda \cdot dF \cdot d\tau \cdot \text{grad}T = -\lambda \cdot dF \cdot d\tau \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right).$$

Коэффициент пропорциональности λ характеризует способность вещества проводить теплоту и называется коэффициентом теплопроводности и численно равен количеству теплоты, проходящей через единицу площади изотермической поверхности в единицу времени при температурном градиенте, равном единице. Он измеряется в Вт/(м·К) и является теплофизической характеристикой вещества. Значения коэффициентов теплопроводности для некоторых веществ представлены в таблице 5.1.

Количество теплоты, проходящей в единицу времени через единицу площади изотермической поверхности, называется плотностью теплового потока (Вт/м²)

$$\vec{q} = \frac{dQ_\tau}{dF \cdot d\tau} = -\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right).$$

Так как теплота всегда распространяется от более нагретых частей тела к менее нагретым, то и вектор плотности теплового потока направлен по нормали к изотермической поверхности в сторону убывания температуры.

Количество теплоты, проходящей через произвольную изотермическую поверхность площадью F в единицу времени, называется тепловым потоком Q (Вт):

$$Q = \int_F q dF = - \int_F \lambda \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right) dF = - \lambda \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right) F .$$

Таблица 5.1 – Коэффициенты теплопроводности некоторых материалов при комнатной температуре и нормальном давлении

Материал	λ , (Вт/(м·К))	Материал	λ , (Вт/(м·К))
Серебро	458	Железобетон	1,55
Медь	384	Кирпич красный	0,77
Алюминий	204	-»- силикатный	0,81
Латунь	85	-»- изоляционный	0,14
Чугун	63	Шлаковая вата	0,07
Сталь углеродистая	45	Пенопласт ПСБ-С	0,04
Аммиак (жидкий)	0,57	Воздух	0,0245
Вода	0,55	Водород	0,175
Снег	0,47	Углекислый газ	0,015
Лед	2,25	Метан	0,003

Основные физико-математические зависимости

В практике часто встречаются стенки, состоящие из нескольких слоев различных материалов (рисунок 5.1).

Рассмотрим стационарный процесс переноса теплоты через многослойную плоскую стенку, содержащую, три плотно прилегающих друг к другу слоя толщиной $\delta_1, \delta_2, \delta_3$. Коэффициенты теплопроводности этих слоев $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$. Температура наружной поверхности T_1 . Тепловой поток Q направлен слева направо следовательно, $T_1 > T_4$.

Задача стационарная, поэтому тепловой поток Q , проходящий через многослойную стенку, одинаков для каждого слоя.

Изотермические поверхности в многослойной плоской стенке будут повторять собой форму самой стенки, иметь постоянную площадь F , и располагаться перпендикулярно оси X (рисунок 5.1 а).

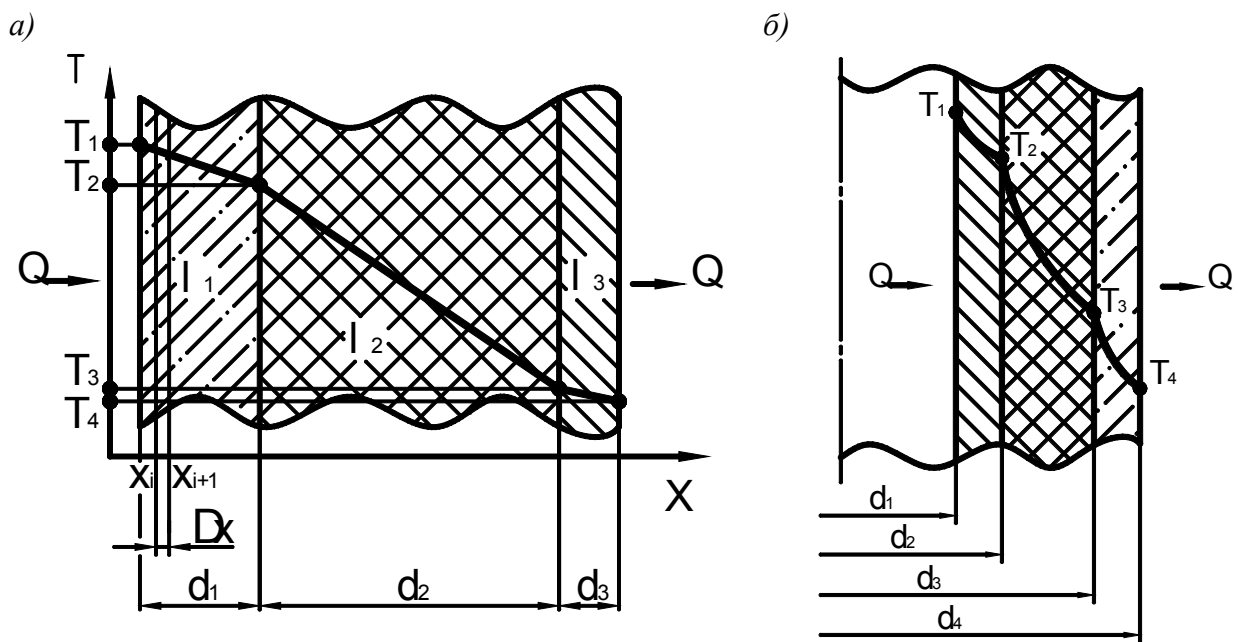


Рисунок 5.1 – Схема передачи теплоты через многослойные стенки
 а – плоскую, б – цилиндрическую

При построении математической модели рекомендуется каждый слой разбить на несколько подслоев и перейти от частной производной ($\partial T/\partial n$) к конечным разностям ($\Delta T/\Delta X$). Тогда уравнение теплопроводности для i -го подслоя будет иметь вид:

$$Q = \lambda_j \frac{T_{i-1} - T_i}{X_i - X_{i-1}} F.$$

При моделировании теплопередачи в многослойной цилиндрической стенке необходимо учитывать изменение площади теплопередачи F_i при увеличении диаметра цилиндра. Площадь поверхности i -го изотермического цилиндра можно определить как:

$$F_i = \pi \cdot d_i \cdot l,$$

где d_i – диаметр i -го цилиндра, l – высота цилиндра.

Уравнение теплопроводности для i -го слоя цилиндрической стенки

$$Q = \lambda_j \frac{T_{i-1} - T_i}{(d_i - d_{i-1})/2} F_i.$$

Методика разработки модели

Математическая модель теплопередачи в многослойных стенках может быть реализована на любом алгоритмическом языке программирования или в приложениях Windows для решения инженерных задач.

Исходные данные берутся из таблицы 5.2 согласно варианту.

Математическое описание модели преобразуется, в математическую модель. При необходимости используются численные методы.

Составляется алгоритм реализации модели и программа расчета. Программа должна содержать блок ввода исходных данных, расчетный блок и блок вывода результатов моделирования. Результаты представляются в виде таблиц и графиков.

После составления программы модели, проводится тестирование и отладка.

Анализ результатов моделирования

Полученные результаты моделирования анализируются по значениям температуры в точках перехода от одного материала к другому и характеру поведения кривых изменения температуры по толщине стенки.

Контрольные значения температур на границах слоев определяются по следующим зависимостям:

для плоской стенки

$$T_2 = T_1 - \frac{Q \cdot \left(\frac{\delta_1}{\lambda_1} \right)}{F};$$

$$T_3 = T_1 - \frac{Q \cdot \left(\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} \right)}{F};$$

$$T_4 = T_1 - \frac{Q \cdot \left(\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} \right)}{F};$$

для цилиндрической стенки

$$T_2 = T_1 - \frac{Q}{2\pi l \lambda_1} \ln \frac{d_2}{d_1};$$

$$T_3 = T_1 - \frac{Q}{2\pi l} \left(\frac{1}{\lambda_1} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\lambda_2} \ln \frac{d_3}{d_2} \right);$$

$$T_4 = T_1 - \frac{Q}{2\pi l} \left(\frac{1}{\lambda_1} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\lambda_2} \ln \frac{d_3}{d_2} + \frac{1}{\lambda_3} \ln \frac{d_4}{d_3} \right).$$

Таблица 5.2 – Исходные данные для моделирования теплопроводности
в плоской стенке

Вариант	Q , Вт	T_1 , К	F , м ²	δ_1 , м	λ_1 , $\frac{\hat{A}\delta}{i \cdot \hat{E}}$	δ_2 , м	λ_2 , $\frac{\hat{A}\delta}{i \cdot \hat{E}}$	δ_3 , м	λ_3 , $\frac{\hat{A}\delta}{i \cdot \hat{E}}$
1.	300	500	1,0	0,02	350	0,30	0,50	0,02	2,0
2.	1000	700	2,5	0,002	50	0,05	0,05	0,001	1,0
3.	250	950	1,5	0,10	0,77	0,50	0,14	0,1	0,81
4.	740	1200	0,30	0,003	45	0,025	0,07	0,002	5,8
5.	100	350	5,0	0,005	45	0,25	0,05	0,001	120
6.	3600	725	4,5	0,1	380	0,25	0,65	0,20	1,2
7.	1000	500	0,25	0,25	25	0,12	50	0,50	12,5
8.	250	350	0,15	0,018	350	0,045	1,2	0,027	50
9.	350	950	0,45	0,02	63	0,12	0,15	0,02	200
10.	40	300	4,8	0,20	1,5	0,50	0,15	0,12	0,81

Таблица 5.3 – Исходные данные для моделирования теплопроводности
в плоской стенке

Вариант	Q , Вт	T , К	l , м	d_1 , м	λ_1 , $\frac{\dot{A} \cdot \delta}{i \cdot \hat{E}}$	d_2 , м	λ_2 , $\frac{\dot{A} \cdot \delta}{i \cdot \hat{E}}$	d_3 , м	λ_3 , $\frac{\dot{A} \cdot \delta}{i \cdot \hat{E}}$	d_3 , м
1.	1500	350	0,25	0,012	380	0,044	60	0,050	1,5	0,054
2.	1000	475	1,75	0,018	200	0,056	0,15	0,074	45	0,082
3.	600	690	2,0	0,24	1,55	0,36	0,04	0,48	0,70	0,62
4.	3600	820	1,25	0,036	65	0,048	0,2	0,060	300	0,065
5.	850	1350	0,75	0,42	45	0,50	0,07	0,75	60	0,78
6.	3500	750	5,0	0,048	375	0,054	45	0,060	0,055	0,075
7.	1800	675	2,0	0,65	0,81	0,85	63	1,0	0,04	1,10
8.	2750	450	1,33	0,080	175	0,12	45	0,15	1,80	0,18
9.	1200	870	0,85	0,36	50	0,44	0,05	0,50	350	0,52
10.	1600	910	1,0	0,024	0,25	0,036	45	0,040	0,07	0,42

Литература

1. Железко, Б.Е. Термодинамика, теплопередача и двигатели внутреннего сгорания / Б.Е. Железко, В.М. Адамов, Р.И. Есьман, под ред. Б.Е. Железко. – Минск: Вышэйшая школа, 1985. – 271 с.
2. Колчин, А.И. Расчет автомобильных и тракторных двигателей: учебное пособие для вузов / А.И. Колчин, В.П. Демидов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 2002. – 496 с.
3. Кудинов, В.А. Техническая термодинамика: учебное пособие для втузов / В.А. Кудинов, Э.М. Карташов. – М.: Высшая школа, 2000. – 193 с.
4. Механика материалов: учебное пособие для втузов / Н.С. Траймак [и др.]; под ред. Ю.В. Василевич, Л.Е. Реут. – Минск: Технопринт, 2002. – 193 с.
5. Писаренко, Г.С. Справочник по сопротивлению материалов / Г.С. Писаренко, А.П. Яковлев, В.В. Матвеев. – Изд. 2-е, перераб. И доп. – Киев: Наукова думка, 1988. – 734 с.
6. Тарасик, В.П. Математическое моделирование технических систем: учебник для технических специальностей вузов / В.П. Тарасик. – Минск: Дизайн ПРО, 1997. – 640 с.
7. Теоретическая механика. Термодинамика. Теплообмен / ред.- сост. К.С. Колесников, А.И. Леонтьев, ред. К.В. Фролов. – М.: Машиностроение. – Раздел 1: Инженерные методы расчетов. – 1999. – Т. 1–2. – 600 с.

Содержание

Введение.....	3
ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ.....	4
<i>Лабораторная работа № 1</i> КИНЕМАТИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА КРИВОШИПНО-ШАТУННОГО МЕХАНИЗМА ДВИГАТЕЛЯ.....	5
<i>Лабораторная работа № 2</i> КИНЕМАТИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ГАЗОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОГО МЕХАНИЗМА ДВИГАТЕЛЯ.....	10
<i>Лабораторная работа № 3</i> ПРОФИЛИРОВАНИЕ СТЕРЖНЕЙ И БАЛОК РАВНОЙ ПРОЧНОСТИ.....	21
<i>Лабораторная работа № 4</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ЦИКЛОВ ПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ.....	28
<i>Лабораторная работа № 5</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ЧЕРЕЗ МНОГОСЛОЙНЫЕ СТЕНКИ.....	34
Литература.....	40

2.3 Перечень тем курсовых работ по дисциплине «Математическое моделирование производственных процессов»

1. Математическое моделирование скоростных свойств «разгон-выбег» автомобиля.
2. Математическое моделирование напряжённого состояния деталей двигателей внутреннего сгорания методом конечных элементов.
3. Математическое моделирование теплового состояния деталей двигателей внутреннего сгорания методом конечных элементов.
4. Математическое моделирование движения газовых потоков проточных элементов двигателей внутреннего сгорания методом конечных элементов.
5. Математическое моделирование рабочих процессов двигателей внутреннего сгорания методом конечных разностей.

3. РАЗДЕЛ КОНТРОЛЯ ЗНАНИЙ

3.1 Перечень вопросов для текущей и итоговой аттестации (зачёт)

1. Что такое «объект моделирования».
2. Что такое «модель» и «моделирование».
3. Примеры существующих моделей.
4. История создания моделей и их примеры.
5. По каким признакам классифицируются модели.
6. Классификация моделей в зависимости от уровня абстрактности.
7. Способы представления абстрактных моделей.
8. Иерархическая структура объекта моделирования и использование её в системном представлении в моделировании.
9. Преимущества системного представления в моделировании.
10. Какие модели включает в себя модель технической системы в процессе проектирования.
11. Что такое «математическая модель» и «математическое моделирование».
12. Признаки классификации и типы математических моделей.
13. Какие математические модели относятся к структурным моделям, а какие к функциональным.
14. Комбинация каких элементов составляет структуру математических моделей.
15. Формы представления математических моделей.
16. Требования к математическим моделям.
17. Какими нормами оценивается точность математической модели.
18. Объекты математического моделирования на различных уровнях.
19. Что является объектами моделирования на микроуровне.
20. Какой математический аппарат используется при моделировании на микроуровне.
21. Какие две процедуры лежат в основе численных методов при моделировании на микроуровне.
22. Что является объектами моделирования на макроуровне.
23. Какие уравнения лежат в основе математических моделей на макроуровне.
24. Что является предпосылкой создания единого математического и программного обеспечения для моделирования объектов на макроуровне.
25. Что является объектами моделирования на метауровне.
26. Какая теория и какой математический аппарат лежит в основе математических моделей на метауровне.
27. Какие два процесса составляют математическое моделирование.
28. Какие этапы определяют процесс математического моделирования.
29. Какие вопросы ставит разработчик математической модели при определении целей и задач моделирования.
30. Что необходимо выявить при определении объекта моделирования.
31. Что включает в себя этап «Составление содержательного описания объекта моделирования».

32. Какие действия выполняются при составлении концептуальной модели.
33. Какие вопросы ставятся при составлении формального описания объекта моделирования.
34. Какие два подхода используются при преобразовании формального описания в математическую модель.
35. Этапы алгоритмизации и программирования модели.
36. Требования к программам моделирования.
37. Формальные и неформальные процедуры при верификации математической модели.
38. Калибровка математической модели.
39. Что оценивается при исследовании свойств математической модели.
40. Приёмы упрощения математической модели.
41. Задачи анализа и синтеза технической системы при выполнении вычислительного эксперимента.
42. Типовые модели элементов двигателей внутреннего сгорания.
43. Предпосылки разработки математических моделей для двигателей внутреннего сгорания на микроуровне.
44. Применение метода сеток и метода конечных элементов для моделирования элементов двигателей внутреннего сгорания на микроуровне.
45. Предпосылки разработки математических моделей для двигателей внутреннего сгорания на макроуровне.
46. Моделирование механических поступательных и вращательных систем.
47. Компонентные и топологические уравнения, используемые при моделировании механических поступательных и вращательных систем.
48. Предпосылки разработки математических моделей для двигателей внутреннего сгорания на метауровне.
49. Роль корреляционного и регрессионного анализов при разработке статистических моделей двигателей внутреннего сгорания.
50. Последовательность разработки регрессионной модели.
51. Планирование эксперимента и его этапы.
52. Обработка и оценка результатов эксперимента при выполнении корреляционного и регрессионного анализов.
53. Система математических моделей двигателей внутреннего сгорания.

4.2 Рабочий учебный план для специальности 1-37 01 01 «Двигатели внутреннего сгорания» дневная формы обучения

<p style="text-align: center;">УТВЕРЖДАЮ</p> <p>Ректор Белорусского национального технического университета</p> <p style="text-align: center;">Е.М.Хрусталева</p> <p>" 09 " 07 2008 г.</p> <p>Регистрационный № _____</p>	<p>МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ</p> <p>РАБОЧИЙ УЧЕБНЫЙ ПЛАН</p> <p>Специальность 1-37 01 01 Двигатели внутреннего сгорания</p> <p>Специализация 1-37 01 01 01 Двигатели автомобилей, тракторов и сельхозмашин</p>	<p>БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ</p> <p>Квалификация специальности : _____</p> <p>номер - место: НАБСР-2008-2011</p> <p>Срок обучения: 5 лет</p>																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
<p>I. График учебного процесса</p>																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; font-size: 8px;"> <tr> <th rowspan="2">Дисциплина</th> <th colspan="12">сентябрь</th> <th colspan="12">октябрь</th> <th colspan="12">ноябрь</th> <th colspan="12">декабрь</th> <th colspan="12">январь</th> <th colspan="12">февраль</th> <th colspan="12">март</th> <th colspan="12">апрель</th> <th colspan="12">май</th> <th colspan="12">июнь</th> <th colspan="12">июль</th> <th colspan="12">август</th> <th rowspan="2">Итого</th> </tr> <tr> <th>01</th><th>02</th><th>03</th><th>04</th><th>05</th><th>06</th><th>07</th><th>08</th><th>09</th><th>10</th><th>11</th><th>12</th><th>13</th><th>14</th><th>15</th><th>16</th><th>17</th><th>18</th><th>19</th><th>20</th><th>21</th><th>22</th><th>23</th><th>24</th><th>25</th><th>26</th><th>27</th><th>28</th><th>29</th><th>30</th><th>31</th><th>01</th><th>02</th><th>03</th><th>04</th><th>05</th><th>06</th><th>07</th><th>08</th><th>09</th><th>10</th><th>11</th><th>12</th><th>13</th><th>14</th><th>15</th><th>16</th><th>17</th><th>18</th><th>19</th><th>20</th><th>21</th><th>22</th><th>23</th><th>24</th><th>25</th><th>26</th><th>27</th><th>28</th><th>29</th><th>30</th><th>31</th><th>01</th><th>02</th><th>03</th><th>04</th><th>05</th><th>06</th><th>07</th><th>08</th><th>09</th><th>10</th><th>11</th><th>12</th><th>13</th><th>14</th><th>15</th><th>16</th><th>17</th><th>18</th><th>19</th><th>20</th><th>21</th><th>22</th><th>23</th><th>24</th><th>25</th><th>26</th><th>27</th><th>28</th><th>29</th><th>30</th><th>31</th><th>01</th><th>02</th><th>03</th><th>04</th><th>05</th><th>06</th><th>07</th><th>08</th><th>09</th><th>10</th><th>11</th><th>12</th><th>13</th><th>14</th><th>15</th><th>16</th><th>17</th><th>18</th><th>19</th><th>20</th><th>21</th><th>22</th><th>23</th><th>24</th><th>25</th><th>26</th><th>27</th><th>28</th><th>29</th><th>30</th><th>31</th><th>01</th><th>02</th><th>03</th><th>04</th><th>05</th><th>06</th><th>07</th><th>08</th><th>09</th><th>10</th><th>11</th><th>12</th><th>13</th><th>14</th><th>15</th><th>16</th><th>17</th><th>18</th><th>19</th><th>20</th><th>21</th><th>22</th><th>23</th><th>24</th><th>25</th><th>26</th><th>27</th><th>28</th><th>29</th><th>30</th><th>31</th><th>01</th><th>02</th><th>03</th><th>04</th><th>05</th><th>06</th><th>07</th><th>08</th><th>09</th><th>10</th><th>11</th><th>12</th><th>13</th><th>14</th><th>15</th><th>16</th><th>17</th><th>18</th><th>19</th><th>20</th><th>21</th><th>22</th><th>23</th><th>24</th><th>25</th><th>26</th><th>27</th><th>28</th><th>29</th><th>30</th><th>31</th><th>01</th><th>02</th><th>03</th><th>04</th><th>05</th><th>06</th><th>07</th><th>08</th><th>09</th><th>10</th><th>11</th><th>12</th><th>13</th><th>14</th><th>15</th><th>16</th><th>17</th><th>18</th><th>19</th><th>20</th><th>21</th><th>22</th><th>23</th><th>24</th><th>25</th><th>26</th><th>27</th><th>28</th><th>29</th><th>30</th><th>31</th><th>01</th><th>02</th><th>03</th><th>04</th><th>05</th><th>06</th><th>07</th><th>08</th><th>09</th><th>10</th><th>11</th><th>12</th><th>13</th><th>14</th><th>15</th><th>16</th><th>17</th><th>18</th><th>19</th><th>20</th><th>21</th><th>22</th><th>23</th><th>24</th><th>25</th><th>26</th><th>27</th><th>28</th><th>29</th><th>30</th><th>31</th><th>01</th><th>02</th><th>03</th><th>04</th><th>05</th><th>06</th><th>07</th><th>08</th><th>09</th><th>10</th><th>11</th><th>12</th><th>13</th><th>14</th><th>15</th><th>16</th><th>17</th><th>18</th><th>19</th><th>20</th><th>21</th><th>22</th><th>23</th><th>24</th><th>25</th><th>26</th><th>27</th><th>28</th><th>29</th><th>30</th><th>31</th><th>01</th><th>02</th><th>03</th><th>04</th><th>05</th><th>06</th><th>07</th><th>08</th><th>09</th><th>10</th><th>11</th><th>12</th><th>13</th><th>14</th><th>15</th><th>16</th><th>17</th><th>18</th><th>19</th><th>20</th><th>21</th><th>22</th><th>23</th><th>24</th><th>25</th><th>26</th><th>27</th><th>28</th><th>29</th><th>30</th><th>31</th><th>01</th><th>02</th><th>03</th><th>04</th><th>05</th><th>06</th><th>07</th><th>08</th><th>09</th><th>10</th><th>11</th><th>12</th><th>13</th><th>14</th><th>15</th><th>16</th><th>17</th><th>18</th><th>19</th><th>20</th><th>21</th><th>22</th><th>23</th><th>24</th><th>25</th><th>26</th><th>27</th><th>28</th><th>29</th><th>30</th><th>31</th><th>01</th><th>02</th><th>03</th><th>04</th><th>05</th><th>06</th><th>07</th><th>08</th><th>09</th><th>10</th><th>11</th><th>12</th><th>13</th><th>14</th><th>15</th><th>16</th><th>17</th><th>18</th><th>19</th><th>20</th><th>21</th><th>22</th><th>23</th><th>24</th><th>25</th><th>26</th><th>27</th><th>28</th><th>29</th><th>30</th><th>31</th><th>01</th><th>02</th><th>03</th><th>04</th><th>05</th><th>06</th><th>07</th><th>08</th><th>09</th><th>10</th><th>11</th><th>12</th><th>13</th><th>14</th><th>15</th><th>16</th><th>17</th><th>18</th><th>19</th><th>20</th><th>21</th><th>22</th><th>23</th><th>24</th><th>25</th><th>26</th><th>27</th><th>28</th><th>29</th><th>30</th><th>31</th><th>01</th><th>02</th><th>03</th><th>04</th><th>05</th><th>06</th><th>07</th><th>08</th><th>09</th><th>10</th><th>11</th><th>12</th><th>13</th><th>14</th><th>15</th><th>16</th><th>17</th><th>18</th><th>19</th><th>20</th><th>21</th><th>22</th><th>23</th><th>24</th><th>25</th><th>26</th><th>27</th><th>28</th><th>29</th><th>30</th><th>31</th><th>01</th><th>02</th><th>03</th><th>04</th><th>05</th><th>06</th><th>07</th><th>08</th><th>09</th><th>10</th><th>11</th><th>12</th><th>13</th><th>14</th><th>15</th><th>16</th><th>17</th><th>18</th><th>19</th><th>20</th><th>21</th><th>22</th><th>23</th><th>24</th><th>25</th><th>26</th><th>27</th><th>28</th><th>29</th><th>30</th><th>31</th><th>01</th><th>02</th><th>03</th><th>04</th><th>05</th><th>06</th><th>07</th><th>08</th><th>09</th><th>10</th><th>11</th><th>12</th><th>13</th><th>14</th><th>15</th><th>16</th><th>17</th><th>18</th><th>19</th><th>20</th><th>21</th><th>22</th><th>23</th><th>24</th><th>25</th><th>26</th><th>27</th><th>28</th><th>29</th><th>30</th><th>31</th><th>01</th><th>02</th><th>03</th><th>04</th><th>05</th><th>06</th><th>07</th><th>08</th><th>09</th><th>10</th><th>11</th><th>12</th><th>13</th><th>14</th><th>15</th><th>16</th><th>17</th><th>18</th><th>19</th><th>20</th><th>21</th><th>22</th><th>23</th><th>24</th><th>25</th><th>26</th><th>27</th><th>28</th><th>29</th><th>30</th><th>31</th><th>01</th><th>02</th><th>03</th><th>04</th><th>05</th><th>06</th><th>07</th><th>08</th><th>09</th><th>10</th><th>11</th><th>12</th><th>13</th><th>14</th><th>15</th><th>16</th><th>17</th><th>18</th><th>19</th><th>20</th><th>21</th><th>22</th><th>23</th><th>24</th><th>25</th><th>26</th><th>27</th><th>28</th><th>29</th><th>30</th><th>31</th><th>01</th><th>02</th><th>03</th><th>04</th><th>05</th><th>06</th><th>07</th><th>08</th><th>09</th><th>10</th><th>11</th><th>12</th><th>13</th><th>14</th><th>15</th><th>16</th><th>17</th><th>18</th><th>19</th><th>20</th><th>21</th><th>22</th><th>23</th><th>24</th><th>25</th><th>26</th><th>27</th><th>28</th><th>29</th><th>30</th><th>31</th><th>01</th><th>02</th><th>03</th><th>04</th><th>05</th><th>06</th><th>07</th><th>08</th><th>09</th><th>10</th><th>11</th><th>12</th><th>13</th><th>14</th><th>15</th><th>16</th><th>17</th><th>18</th><th>19</th><th>20</th><th>21</th><th>22</th><th>23</th><th>24</th><th>25</th><th>26</th><th>27</th><th>28</th><th>29</th><th>30</th><th>31</th><th>01</th><th>02</th><th>03</th><th>04</th><th>05</th><th>06</th><th>07</th><th>08</th><th>09</th><th>10</th><th>11</th><th>12</th><th>13</th><th>14</th><th>15</th><th>16</th><th>17</th><th>18</th><th>19</th><th>20</th><th>21</th><th>22</th><th>23</th><th>24</th><th>25</th><th>26</th><th>27</th><th>28</th><th>29</th><th>30</th><th>31</th><th>01</th><th>02</th><th>03</th><th>04</th><th>05</th><th>06</th><th>07</th><th>08</th><th>09</th><th>10</th><th>11</th><th>12</th><th>13</th><th>14</th><th>15</th><th>16</th><th>17</th><th>18</th><th>19</th><th>20</th><th>21</th><th>22</th><th>23</th><th>24</th><th>25</th><th>26</th><th>27</th><th>28</th><th>29</th><th>30</th><th>31</th><th>01</th><th>02</th><th>03</th><th>04</th><th>05</th><th>06</th><th>07</th><th>08</th><th>09</th><th>10</th><th>11</th><th>12</th><th>13</th><th>14</th><th>15</th><th>16</th><th>17</th><th>18</th><th>19</th><th>20</th><th>21</th><th>22</th><th>23</th><th>24</th><th>25</th><th>26</th><th>27</th><th>28</th><th>29</th><th>30</th><th>31</th><th>01</th><th>02</th><th>03</th><th>04</th><th>05</th><th>06</th><th>07</th><th>08</th><th>09</th><th>10</th><th>11</th><th>12</th><th>13</th><th>14</th><th>15</th><th>16</th><th>17</th><th>18</th><th>19</th><th>20</th><th>21</th><th>22</th><th>23</th><th>24</th><th>25</th><th>26</th><th>27</th><th>28</th><th>29</th><th>30</th><th>31</th><th>01</th><th>02</th><th>03</th><th>04</th><th>05</th><th>06</th><th>07</th><th>08</th><th>09</th><th>10</th><th>11</th><th>12</th><th>13</th><th>14</th><th>15</th><th>16</th><th>17</th><th>18</th><th>19</th><th>20</th><th>21</th><th>22</th><th>23</th><th>24</th><th>25</th><th>26</th><th>27</th><th>28</th><th>29</th><th>30</th><th>31</th><th>01</th><th>02</th><th>03</th><th>04</th><th>05</th><th>06</th><th>07</th><th>08</th><th>09</th><th>10</th><th>11</th><th>12</th><th>13</th><th>14</th><th>15</th><th>16</th><th>17</th><th>18</th><th>19</th><th>20</th><th>21</th><th>22</th><th>23</th><th>24</th><th>25</th><th>26</th><th>27</th><th>28</th><th>29</th><th>30</th><th>31</th><th>01</th><th>02</th><th>03</th><th>04</th><th>05</th><th>06</th><th>07</th><th>08</th><th>09</th><th>10</th><th>11</th><th>12</th><th>13</th><th>14</th><th>15</th><th>16</th><th>17</th><th>18</th><th>19</th><th>20</th><th>21</th><th>22</th><th>23</th><th>24</th><th>25</th><th>26</th><th>27</th><th>28</th><th>29</th><th>30</th><th>31</th><th>01</th><th>02</th><th>03</th><th>04</th><th>05</th><th>06</th><th>07</th><th>08</th><th>09</th><th>10</th><th>11</th><th>12</th><th>13</th><th>14</th><th>15</th><th>16</th><th>17</th><th>18</th><th>19</th><th>20</th><th>21</th><th>22</th><th>23</th><th>24</th><th>25</th><th>26</th><th>27</th><th>28</th><th>29</th><th>30</th><th>31</th><th>01</th><th>02</th><th>03</th><th>04</th><th>05</th><th>06</th><th>07</th><th>08</th><th>09</th><th>10</th><th>11</th><th>12</th><th>13</th><th>14</th><th>15</th><th>16</th><th>17</th><th>18</th><th>19</th><th>20</th><th>21</th><th>22</th><th>23</th><th>24</th><th>25</th><th>26</th><th>27</th><th>28</th><th>29</th><th>30</th><th>31</th><th>01</th><th>02</th><th>03</th><th>04</th><th>05</th><th>06</th><th>07</th><th>08</th><th>09</th><th>10</th><th>11</th><th>12</th><th>13</th><th>14</th><th>15</th><th>16</th><th>17</th><th>18</th><th>19</th><th>20</th><th>21</th><th>22</th><th>23</th><th>24</th><th>25</th><th>26</th><th>27</th><th>28</th><th>29</th><th>30</th><th>31</th><th>01</th><th>02</th><th>03</th><th>04</th><th>05</th><th>06</th><th>07</th><th>08</th><th>09</th><th>10</th><th>11</th><th>12</th><th>13</th><th>14</th><th>15</th><th>16</th><th>17</th><th>18</th><th>19</th><th>20</th><th>21</th><th>22</th><th>23</th><th>24</th><th>25</th><th>26</th><th>27</th><th>28</th><th>29</th><th>30</th><th>31</th><th>01</th><th>02</th><th>03</th><th>04</th><th>05</th><th>06</th><th>07</th><th>08</th><th>09</th><th>10</th><th>11</th><th>12</th><th>13</th><th>14</th><th>15</th><th>16</th><th>17</th><th>18</th><th>19</th><th>20</th><th>21</th><th>22</th><th>23</th><th>24</th><th>25</th><th>26</th><th>27</th><th>28</th><th>29</th><th>30</th><th>31</th><th>01</th><th>02</th><th>03</th><th>04</th><th>05</th><th>06</th><th>07</th><th>08</th><th>09</th><th>10</th><th>11</th><th>12</th><th>13</th><th>14</th><th>15</th><th>16</th><th>17</th><th>18</th><th>19</th><th>20</th><th>21</th><th>22</th><th>23</th><th>24</th><th>25</th><th>26</th><th>27</th><th>28</th><th>29</th><th>30</th><th>31</th><th>01</th><th>02</th><th>03</th><th>04</th><th>05</th><th>06</th><th>07</th><th>08</th><th>09</th><th>10</th><th>11</th><th>12</th><th>13</th><th>14</th><th>15</th><th>16</th><th>17</th><th>18</th><th>19</th><th>20</th><th>21</th><th>22</th><th>23</th><th>24</th><th>25</th><th>26</th><th>27</th><th>28</th><th>29</th><th>30</th><th>31</th><th>01</th><th>02</th><th>03</th><th>04</th><th>05</th><th>06</th><th>07</th><th>08</th><th>09</th><th>10</th><th>11</th><th>12</th><th>13</th><th>14</th><th>15</th><th>16</th><th>17</th><th>18</th><th>19</th><th>20</th><th>21</th><th>22</th><th>23</th><th>24</th><th>25</th><th>26</th><th>27</th><th>28</th><th>29</th><th>30</th><th>31</th><th>01</th><th>02</th><th>03</th><th>04</th><th>05</th><th>06</th><th>07</th><th>08</th><th>09</th><th>10</th><th>11</th><th>12</th><th>13</th><th>14</th><th>15</th><th>16</th><th>17</th><th>18</th><th>19</th><th>20</th><th>21</th><th>22</th><th>23</th><th>24</th><th>25</th><th>26</th><th>27</th><th>28</th><th>29</th><th>30</th><th>31</th><th>01</th><th>02</th><th>03</th><th>04</th><th>05</th><th>06</th><th>07</th><th>08</th><th>09</th><th>10</th><th>11</th><th>12</th><th>13</th><th>14</th><th>15</th><th>16</th><th>17</th><th>18</th><th>19</th><th>20</th><th>21</th><th>22</th><th>23</th><th>24</th><th>25</th><th>26</th><th>27</th><th>28</th><th>29</th><th>30</th><th>31</th><th>01</th><th>02</th><th>03</th><th>04</th><th>05</th><th>06</th><th>07</th><th>08</th><th>09</th><th>10</th><th>11</th><th>12</th><th>13</th><th>14</th><th>15</th><th>16</th><th>17</th><th>18</th><th>19</th><th>20</th><th>21</th><th>22</th><th>23</th><th>24</th><th>25</th><th>26</th><th>27</th><th>28</th><th>29</th><th>30</th><th>31</th><th>01</th><th>02</th><th>03</th><th>04</th><th>05</th><th>06</th><th>07</th><th>08</th><th>09</th><th>10</th><th>11</th><th>12</th><th>13</th><th>14</th><th>15</th><th>16</th><th>17</th><th>18</th><th>19</th><th>20</th><th>21</th><th>22</th><th>23</th><th>24</th><th>25</th><th>26</th><th>27</th><th>28</th><th>29</th><th>30</th><th>31</th><th>01</th><th>02</th><th>03</th><th>04</th><th>05</th><th>06</th><th>07</th><th>08</th><th>09</th><th>10</th><th>11</th><th>12</th><th>13</th><th>14</th><th>15</th><th>16</th><th>17</th><th>18</th><th>19</th><th>20</th><th>21</th><th>22</th><th>23</th><th>24</th><th>25</th><th>26</th><th>27</th><th>28</th><th>29</th><th>30</th><th>31</th><th>01</th><th>02</th><th>03</th><th>04</th><th>05</th><th>06</th><th>07</th><th>08</th><th>09</th><th>10</th><th>11</th><th>12</th><th>13</th><th>14</th><th>15</th><th>16</th><th>17</th><th>18</th><th>19</th><th>20</th><th>21</th><th>22</th><th>23</th><th>24</th><th>25</th><th>26</th><th>27</th><th>28</th><th>29</th><th>30</th><th>31</th><th>01</th><th>02</th><th>03</th><th>04</th><th>05</th><th>06</th><th>07</th><th>08</th><th>09</th><th>10</th><th>11</th><th>12</th><th>13</th><th>14</th><th>15</th><th>16</th><th>17</th><th>18</th><th>19</th><th>20</th><th>21</th><th>22</th><th>23</th><th>24</th><th>25</th><th>26</th><th>27</th><th>28</th><th>29</th><th>30</th><th>31</th><th>01</th><th>02</th><th>03</th><th>04</th><th>05</th><th>06</th><th>07</th><th>08</th><th>09</th><th>10</th><th>11</th><th>12</th><th>13</th><th>14</th><th>15</th><th>16</th><th>17</th><th>18</th><th>19</th><th>20</th><th>21</th><th>22</th><th>23</th><th>24</th><th>25</th><th>26</th><th>27</th><th>28</th><th>29</th><th>30</th><th>31</th><th>01</th><th>02</th><th>03</th><th>04</th><th>05</th><th>06</th><th>07</th><th>08</th><th>09</th><th>10</th><th>11</th><th>12</th><th>13</th><th>14</th><th>15</th><th>16</th><th>17</th><th>18</th><th>19</th><th>20</th><th>21</th><th>22</th><th>23</th><th>24</th><th>25</th><th>26</th><th>27</th><th>28</th><th>29</th><th>30</th><th>31</th><th>01</th><th>02</th><th>03</th><th>04</th><th>05</th><th>06</th><th>07</th><th>08</th><th>09</th><th>10</th><th>11</th><th>12</th><th>13</th><th>14</th><th>15</th><th>16</th><th>17</th><th>18</th><th>19</th><th>20</th><th>21</th><th>22</th><th>23</th><th>24</th><th>25</th><th>26</th><th>27</th><th>28</th><th>29</th><th>30</th><th>31</th><th>01</th><th>02</th><th>03</th><th>04</th><th>05</th><th>06</th><th>07</th><th>08</th><th>09</th><th>10</th><th>11</th><th>12</th><th>13</th><th>14</th><th>15</th><th>16</th><th>17</th><th>18</th><th>19</th><th>20</th><th>21</th><th>22</th><th>23</th><th>24</th><th>25</th><th>26</th><th>27</th><th>28</th><th>29</th><th>30</th><th>31</th><th>01</th><th>02</th><th>03</th><th>04</th><th>05</th><th>06</th><th>07</th><th>08</th><th>09</th><th>10</th><th>11</th><th>12</th><th>13</th><th>14</th><th>15</th><th>16</th><th>17</th><th>18</th><th>19</th><th>20</th><th>21</th><th>22</th><th>23</th><th>24</th><th>25</th><th>26</th><th>27</th><th>28</th><th>29</th><th>30</th><th>31</th><th>01</th><th>02</th><th>03</th><th>04</th><th>05</th><th>06</th><th>07</th><th>08</th><th>09</th><th>10</th><th>11</th><th>12</th><th>13</th><th>14</th><th>15</th><th>16</th><th>17</th><th>18</th><th>19</th><th>20</th><th>21</th><th>22</th><th>23</th><th>24</th><th>25</th><th>26</th><th>27</th><th>28</th><th>29</th><th>30</th><th>31</th><th>01</th><th>02</th><th>03</th><th>04</th><th>05</th><th>06</th><th>07</th><th>08</th><th>09</th><th>10</th><th>11</th><th>12</th><th>13</th><th>14</th><th>15</th><th>16</th><th>17</th><th>18</th><th>19</th><th>20</th><th>21</th><th>22</th><th>23</th><th>24</th><th>25</th><th>26</th><th>27</th><th>28</th><th>29</th><th>30</th><th>31</th><th>01</th><th>02</th><th>03</th><th>04</th><th>05</th><th>06</th><th>07</th><th>08</th><th>09</th><th>10</th><th>11</th><th>12</th><th>13</th><th>14</th><th>15</th><th>16</th><th>17</th><th>18</th><th>19</th><th>20</th><th>21</th><th>22</th><th>23</th><th>24</th><th>25</th><th>26</th><th>27</th><th>28</th><th>29</th><th>30</th><th>31</th><th>01</th><th>02</th><th>03</th><th>04</th><th>05</th><th>06</th><th>07</th><th>08</th><th>09</th><th>10</th><th>11</th><th>12</th><th>13</th><th>14</th><th>15</th><th>16</th><th>17</th><th>18</th><th>19</th><th>20</th><th>21</th><th>22</th><th>23</th><th>24</th><th>25</th><th>26</th><th>27</th><th>28</th><th>29</th><th>30</th><th>31</th><th>01</th><th>02</th><th>03</th><th>04</th><th>05</th><th>06</th><th>07</th><th>08</th><th>09</th><th>10</th><th>11</th><th>12</th><th>13</th><th>14</th><th>15</th><th>16</th><th>17</th><th>18</th><th>19</th><th>20</th><th>21</th><th>22</th><th>23</th><th>24</th><th>25</th><th>26</th><th>27</th><th>28</th><th>29</th><th>30</th><th>31</th><th>01</th><th>02</th><th>03</th><th>04</th><th>05</th><th>06</th><th>07</th><th>08</th><th>09</th><th>10</th><th>11</th><th>12</th><th>13</th><th>14</th><th>15</th><th>16</th><th>17</th><th>18</th><th>19</th><th>20</th><th>21</th><th>22</th><th>23</th><th>24</th><th>25</th><th>26</th><th>27</th><th>28</th><th>29</th><th>30</th><th>31</th><th>01</th><th>02</th><th>03</th><th>04</th><th>05</th><th>06</th><th>07</th><th>08</th><th>09</th><th>10</th><th>11</th><th>12</th><th>13</th><th>14</th><th>15</th><th>16</th><th>17</th><th>18</th></tr></table>			Дисциплина	сентябрь												октябрь												ноябрь												декабрь												январь												февраль												март												апрель												май												июнь												июль												август												Итого	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Дисциплина	сентябрь												октябрь												ноябрь												декабрь												январь												февраль												март												апрель												май												июнь												июль												август												Итого																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20		21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18																																																																																																																																																			

4.3 Рабочий учебный план для специальности 1-37 01 01 «Двигатели внутреннего сгорания» заочной формы обучения

УТВЕРЖДАЮ		Белорусский национальный технический университет																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																													
Ректор БНТУ		РАБОЧИЙ УЧЕБНЫЙ ПЛАН																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																													
Б.М. Хрусталева		(заочная форма получения высшего образования)																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																													
" 24 " 01 2011 г.		Специальность	1-37 01 01 Двигатели внутреннего сгорания																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
Регистрационный №		Направление специальности	1-37 01 01 01 Двигатели автомобилей, тракторов и сельхозмашин																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
			Квалификационный специалист: инженер-техник																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
			Срок обучения: 6 лет																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
		I. График учебного процесса												II. Сводная таблица бюджета времени по семестрам																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
		<table border="1"> <tr> <th rowspan="2">К</th> <th colspan="2">Семестр</th> <th colspan="2">Семестр</th> <th colspan="2">Семестр</th> <th colspan="2">Семестр</th> <th colspan="2">Семестр</th> <th colspan="2">Семестр</th> <th colspan="2">Семестр</th> <th colspan="2">Семестр</th> <th colspan="2">Семестр</th> <th colspan="2">Семестр</th> <th colspan="2">Семестр</th> <th colspan="2">Семестр</th> <th rowspan="2">Итого</th> <th rowspan="2">Итого</th> </tr> <tr> <th>1</th><th>2</th><th>3</th><th>4</th><th>5</th><th>6</th><th>7</th><th>8</th><th>9</th><th>10</th><th>11</th><th>12</th><th>13</th><th>14</th><th>15</th><th>16</th><th>17</th><th>18</th><th>19</th><th>20</th><th>21</th><th>22</th><th>23</th><th>24</th><th>25</th><th>26</th><th>27</th><th>28</th><th>29</th><th>30</th><th>31</th><th>32</th><th>33</th><th>34</th><th>35</th><th>36</th><th>37</th><th>38</th><th>39</th><th>40</th><th>41</th><th>42</th><th>43</th><th>44</th><th>45</th><th>46</th><th>47</th><th>48</th><th>49</th><th>50</th><th>51</th><th>52</th><th>53</th><th>54</th><th>55</th><th>56</th><th>57</th><th>58</th><th>59</th><th>60</th><th>61</th><th>62</th><th>63</th><th>64</th><th>65</th><th>66</th><th>67</th><th>68</th><th>69</th><th>70</th><th>71</th><th>72</th><th>73</th><th>74</th><th>75</th><th>76</th><th>77</th><th>78</th><th>79</th><th>80</th><th>81</th><th>82</th><th>83</th><th>84</th><th>85</th><th>86</th><th>87</th><th>88</th><th>89</th><th>90</th><th>91</th><th>92</th><th>93</th><th>94</th><th>95</th><th>96</th><th>97</th><th>98</th><th>99</th><th>100</th><th>101</th><th>102</th><th>103</th><th>104</th><th>105</th><th>106</th><th>107</th><th>108</th><th>109</th><th>110</th><th>111</th><th>112</th><th>113</th><th>114</th><th>115</th><th>116</th><th>117</th><th>118</th><th>119</th><th>120</th><th>121</th><th>122</th><th>123</th><th>124</th><th>125</th><th>126</th><th>127</th><th>128</th><th>129</th><th>130</th><th>131</th><th>132</th><th>133</th><th>134</th><th>135</th><th>136</th><th>137</th><th>138</th><th>139</th><th>140</th><th>141</th><th>142</th><th>143</th><th>144</th><th>145</th><th>146</th><th>147</th><th>148</th><th>149</th><th>150</th><th>151</th><th>152</th><th>153</th><th>154</th><th>155</th><th>156</th><th>157</th><th>158</th><th>159</th><th>160</th><th>161</th><th>162</th><th>163</th><th>164</th><th>165</th><th>166</th><th>167</th><th>168</th><th>169</th><th>170</th><th>171</th><th>172</th><th>173</th><th>174</th><th>175</th><th>176</th><th>177</th><th>178</th><th>179</th><th>180</th><th>181</th><th>182</th><th>183</th><th>184</th><th>185</th><th>186</th><th>187</th><th>188</th><th>189</th><th>190</th><th>191</th><th>192</th><th>193</th><th>194</th><th>195</th><th>196</th><th>197</th><th>198</th><th>199</th><th>200</th><th>201</th><th>202</th><th>203</th><th>204</th><th>205</th><th>206</th><th>207</th><th>208</th><th>209</th><th>210</th><th>211</th><th>212</th><th>213</th><th>214</th><th>215</th><th>216</th><th>217</th><th>218</th><th>219</th><th>220</th><th>221</th><th>222</th><th>223</th><th>224</th><th>225</th><th>226</th><th>227</th><th>228</th><th>229</th><th>230</th><th>231</th><th>232</th><th>233</th><th>234</th><th>235</th><th>236</th><th>237</th><th>238</th><th>239</th><th>240</th><th>241</th><th>242</th><th>243</th><th>244</th><th>245</th><th>246</th><th>247</th><th>248</th><th>249</th><th>250</th><th>251</th><th>252</th><th>253</th><th>254</th><th>255</th><th>256</th><th>257</th><th>258</th><th>259</th><th>260</th><th>261</th><th>262</th><th>263</th><th>264</th><th>265</th><th>266</th><th>267</th><th>268</th><th>269</th><th>270</th><th>271</th><th>272</th><th>273</th><th>274</th><th>275</th><th>276</th><th>277</th><th>278</th><th>279</th><th>280</th><th>281</th><th>282</th><th>283</th><th>284</th><th>285</th><th>286</th><th>287</th><th>288</th><th>289</th><th>290</th><th>291</th><th>292</th><th>293</th><th>294</th><th>295</th><th>296</th><th>297</th><th>298</th><th>299</th><th>300</th><th>301</th><th>302</th><th>303</th><th>304</th><th>305</th><th>306</th><th>307</th><th>308</th><th>309</th><th>310</th><th>311</th><th>312</th><th>313</th><th>314</th><th>315</th><th>316</th><th>317</th><th>318</th><th>319</th><th>320</th><th>321</th><th>322</th><th>323</th><th>324</th><th>325</th><th>326</th><th>327</th><th>328</th><th>329</th><th>330</th><th>331</th><th>332</th><th>333</th><th>334</th><th>335</th><th>336</th><th>337</th><th>338</th><th>339</th><th>340</th><th>341</th><th>342</th><th>343</th><th>344</th><th>345</th><th>346</th><th>347</th><th>348</th><th>349</th><th>350</th><th>351</th><th>352</th><th>353</th><th>354</th><th>355</th><th>356</th><th>357</th><th>358</th><th>359</th><th>360</th><th>361</th><th>362</th><th>363</th><th>364</th><th>365</th><th>366</th><th>367</th><th>368</th><th>369</th><th>370</th><th>371</th><th>372</th><th>373</th><th>374</th><th>375</th><th>376</th><th>377</th><th>378</th><th>379</th><th>380</th><th>381</th><th>382</th><th>383</th><th>384</th><th>385</th><th>386</th><th>387</th><th>388</th><th>389</th><th>390</th><th>391</th><th>392</th><th>393</th><th>394</th><th>395</th><th>396</th><th>397</th><th>398</th><th>399</th><th>400</th><th>401</th><th>402</th><th>403</th><th>404</th><th>405</th><th>406</th><th>407</th><th>408</th><th>409</th><th>410</th><th>411</th><th>412</th><th>413</th><th>414</th><th>415</th><th>416</th><th>417</th><th>418</th><th>419</th><th>420</th><th>421</th><th>422</th><th>423</th><th>424</th><th>425</th><th>426</th><th>427</th><th>428</th><th>429</th><th>430</th><th>431</th><th>432</th><th>433</th><th>434</th><th>435</th><th>436</th><th>437</th><th>438</th><th>439</th><th>440</th><th>441</th><th>442</th><th>443</th><th>444</th><th>445</th><th>446</th><th>447</th><th>448</th><th>449</th><th>450</th><th>451</th><th>452</th><th>453</th><th>454</th><th>455</th><th>456</th><th>457</th><th>458</th><th>459</th><th>460</th><th>461</th><th>462</th><th>463</th><th>464</th><th>465</th><th>466</th><th>467</th><th>468</th><th>469</th><th>470</th><th>471</th><th>472</th><th>473</th><th>474</th><th>475</th><th>476</th><th>477</th><th>478</th><th>479</th><th>480</th><th>481</th><th>482</th><th>483</th><th>484</th><th>485</th><th>486</th><th>487</th><th>488</th><th>489</th><th>490</th><th>491</th><th>492</th><th>493</th><th>494</th><th>495</th><th>496</th><th>497</th><th>498</th><th>499</th><th>500</th><th>501</th><th>502</th><th>503</th><th>504</th><th>505</th><th>506</th><th>507</th><th>508</th><th>509</th><th>510</th><th>511</th><th>512</th><th>513</th><th>514</th><th>515</th><th>516</th><th>517</th><th>518</th><th>519</th><th>520</th><th>521</th><th>522</th><th>523</th><th>524</th><th>525</th><th>526</th><th>527</th><th>528</th><th>529</th><th>530</th><th>531</th><th>532</th><th>533</th><th>534</th><th>535</th><th>536</th><th>537</th><th>538</th><th>539</th><th>540</th><th>541</th><th>542</th><th>543</th><th>544</th><th>545</th><th>546</th><th>547</th><th>548</th><th>549</th><th>550</th><th>551</th><th>552</th><th>553</th><th>554</th><th>555</th><th>556</th><th>557</th><th>558</th><th>559</th><th>560</th><th>561</th><th>562</th><th>563</th><th>564</th><th>565</th><th>566</th><th>567</th><th>568</th><th>569</th><th>570</th><th>571</th><th>572</th><th>573</th><th>574</th><th>575</th><th>576</th><th>577</th><th>578</th><th>579</th><th>580</th><th>581</th><th>582</th><th>583</th><th>584</th><th>585</th><th>586</th><th>587</th><th>588</th><th>589</th><th>590</th><th>591</th><th>592</th><th>593</th><th>594</th><th>595</th><th>596</th><th>597</th><th>598</th><th>599</th><th>600</th><th>601</th><th>602</th><th>603</th><th>604</th><th>605</th><th>606</th><th>607</th><th>608</th><th>609</th><th>610</th><th>611</th><th>612</th><th>613</th><th>614</th><th>615</th><th>616</th><th>617</th><th>618</th><th>619</th><th>620</th><th>621</th><th>622</th><th>623</th><th>624</th><th>625</th><th>626</th><th>627</th><th>628</th><th>629</th><th>630</th><th>631</th><th>632</th><th>633</th><th>634</th><th>635</th><th>636</th><th>637</th><th>638</th><th>639</th><th>640</th><th>641</th><th>642</th><th>643</th><th>644</th><th>645</th><th>646</th><th>647</th><th>648</th><th>649</th><th>650</th><th>651</th><th>652</th><th>653</th><th>654</th><th>655</th><th>656</th><th>657</th><th>658</th><th>659</th><th>660</th><th>661</th><th>662</th><th>663</th><th>664</th><th>665</th><th>666</th><th>667</th><th>668</th><th>669</th><th>670</th><th>671</th><th>672</th><th>673</th><th>674</th><th>675</th><th>676</th><th>677</th><th>678</th><th>679</th><th>680</th><th>681</th><th>682</th><th>683</th><th>684</th><th>685</th><th>686</th><th>687</th><th>688</th><th>689</th><th>690</th><th>691</th><th>692</th><th>693</th><th>694</th><th>695</th><th>696</th><th>697</th><th>698</th><th>699</th><th>700</th><th>701</th><th>702</th><th>703</th><th>704</th><th>705</th><th>706</th><th>707</th><th>708</th><th>709</th><th>710</th><th>711</th><th>712</th><th>713</th><th>714</th><th>715</th><th>716</th><th>717</th><th>718</th><th>719</th><th>720</th><th>721</th><th>722</th><th>723</th><th>724</th><th>725</th><th>726</th><th>727</th><th>728</th><th>729</th><th>730</th><th>731</th><th>732</th><th>733</th><th>734</th><th>735</th><th>736</th><th>737</th><th>738</th><th>739</th><th>740</th><th>741</th><th>742</th><th>743</th><th>744</th><th>745</th><th>746</th><th>747</th><th>748</th><th>749</th><th>750</th><th>751</th><th>752</th><th>753</th><th>754</th><th>755</th><th>756</th><th>757</th><th>758</th><th>759</th><th>760</th><th>761</th><th>762</th><th>763</th><th>764</th><th>765</th><th>766</th><th>767</th><th>768</th><th>769</th><th>770</th><th>771</th><th>772</th><th>773</th><th>774</th><th>775</th><th>776</th><th>777</th><th>778</th><th>779</th><th>780</th><th>781</th><th>782</th><th>783</th><th>784</th><th>785</th><th>786</th><th>787</th><th>788</th><th>789</th><th>790</th><th>791</th><th>792</th><th>793</th><th>794</th><th>795</th><th>796</th><th>797</th><th>798</th><th>799</th><th>800</th><th>801</th><th>802</th><th>803</th><th>804</th><th>805</th><th>806</th><th>807</th><th>808</th><th>809</th><th>810</th><th>811</th><th>812</th><th>813</th><th>814</th><th>815</th><th>816</th><th>817</th><th>818</th><th>819</th><th>820</th><th>821</th><th>822</th><th>823</th><th>824</th><th>825</th><th>826</th><th>827</th><th>828</th><th>829</th><th>830</th><th>831</th><th>832</th><th>833</th><th>834</th><th>835</th><th>836</th><th>837</th><th>838</th><th>839</th><th>840</th><th>841</th><th>842</th><th>843</th><th>844</th><th>845</th><th>846</th><th>847</th><th>848</th><th>849</th><th>850</th><th>851</th><th>852</th><th>853</th><th>854</th><th>855</th><th>856</th><th>857</th><th>858</th><th>859</th><th>860</th><th>861</th><th>862</th><th>863</th><th>864</th><th>865</th><th>866</th><th>867</th><th>868</th><th>869</th><th>870</th><th>871</th><th>872</th><th>873</th><th>874</th><th>875</th><th>876</th><th>877</th><th>878</th><th>879</th><th>880</th><th>881</th><th>882</th><th>883</th><th>884</th><th>885</th><th>886</th><th>887</th><th>888</th><th>889</th><th>890</th><th>891</th><th>892</th><th>893</th><th>894</th><th>895</th><th>896</th><th>897</th><th>898</th><th>899</th><th>900</th><th>901</th><th>902</th><th>903</th><th>904</th><th>905</th><th>906</th><th>907</th><th>908</th><th>909</th><th>910</th><th>911</th><th>912</th><th>913</th><th>914</th><th>915</th><th>916</th><th>917</th><th>918</th><th>919</th><th>920</th><th>921</th><th>922</th><th>923</th><th>924</th><th>925</th><th>926</th><th>927</th><th>928</th><th>929</th><th>930</th><th>931</th><th>932</th><th>933</th><th>934</th><th>935</th><th>936</th><th>937</th><th>938</th><th>939</th><th>940</th><th>941</th><th>942</th><th>943</th><th>944</th><th>945</th><th>946</th><th>947</th><th>948</th><th>949</th><th>950</th><th>951</th><th>952</th><th>953</th><th>954</th><th>955</th><th>956</th><th>957</th><th>958</th><th>959</th><th>960</th><th>961</th><th>962</th><th>963</th><th>964</th><th>965</th><th>966</th><th>967</th><th>968</th><th>969</th><th>970</th><th>971</th><th>972</th><th>973</th><th>974</th><th>975</th><th>976</th><th>977</th><th>978</th><th>979</th><th>980</th><th>981</th><th>982</th><th>983</th><th>984</th><th>985</th><th>986</th><th>987</th><th>988</th><th>989</th><th>990</th><th>991</th><th>992</th><th>993</th><th>994</th><th>995</th><th>996</th><th>997</th><th>998</th><th>999</th><th>1000</th><th>1001</th><th>1002</th><th>1003</th><th>1004</th><th>1005</th><th>1006</th><th>1007</th><th>1008</th><th>1009</th><th>1010</th><th>1011</th><th>1012</th><th>1013</th><th>1014</th><th>1015</th><th>1016</th><th>1017</th><th>1018</th><th>1019</th><th>1020</th><th>1021</th><th>1022</th><th>1023</th><th>1024</th><th>1025</th><th>1026</th><th>1027</th><th>1028</th><th>1029</th><th>1030</th><th>1031</th><th>1032</th><th>1033</th><th>1034</th><th>1035</th><th>1036</th><th>1037</th><th>1038</th><th>1039</th><th>1040</th><th>1041</th><th>1042</th><th>1043</th><th>1044</th><th>1045</th><th>1046</th><th>1047</th><th>1048</th><th>1049</th><th>1050</th><th>1051</th><th>1052</th><th>1053</th><th>1054</th><th>1055</th><th>1056</th><th>1057</th><th>1058</th><th>1059</th><th>1060</th><th>1061</th><th>1062</th><th>1063</th><th>1064</th><th>1065</th><th>1066</th><th>1067</th><th>1068</th><th>1069</th><th>1070</th><th>1071</th><th>1072</th><th>1073</th><th>1074</th><th>1075</th><th>1076</th><th>1077</th><th>1078</th><th>1079</th><th>1080</th><th>1081</th><th>1082</th><th>1083</th><th>1084</th><th>1085</th><th>1086</th><th>1087</th><th>1088</th><th>1089</th><th>1090</th><th>1091</th><th>1092</th><th>1093</th><th>1094</th><th>1095</th><th>1096</th><th>1097</th><th>1098</th><th>1099</th><th>1100</th><th>1101</th><th>1102</th><th>1103</th><th>1104</th><th>1105</th><th>1106</th><th>1107</th><th>1108</th><th>1109</th><th>1110</th><th>1111</th><th>1112</th><th>1113</th><th>1114</th><th>1115</th><th>1116</th><th>1117</th><th>1118</th><th>1119</th><th>1120</th><th>1121</th><th>1122</th><th>1123</th><th>1124</th><th>1125</th><th>1126</th><th>1127</th><th>1128</th><th>1129</th><th>1130</th><th>1131</th><th>1132</th><th>1133</th><th>1134</th><th>1135</th><th>1136</th><th>1137</th><th>1138</th><th>1139</th><th>1140</th><th>1141</th><th>1142</th><th>1143</th><th>1144</th><th>1145</th><th>1146</th><th>1147</th><th>1148</th><th>1149</th><th>1150</th><th>1151</th><th>1152</th><th>1153</th><th>1154</th><th>1155</th><th>1156</th><th>1157</th><th>1158</th><th>1159</th><th>1160</th><th>1161</th><th>1162</th><th>1163</th><th>1164</th><th>1165</th><th>1166</th><th>1167</th><th>1168</th><th>1169</th><th>1170</th><th>1171</th><th>1172</th><th>1173</th><th>1174</th><th>1175</th><th>1176</th><th>1177</th><th>1178</th><th>1179</th><th>1180</th><th>1181</th><th>1182</th><th>1183</th><th>1184</th><th>1185</th><th>1186</th><th>1187</th><th>1188</th><th>1189</th><th>1190</th><th>1191</th><th>1192</th><th>1193</th><th>1194</th><th>1195</th><th>1196</th><th>1197</th><th>1198</th><th>1199</th><th>1200</th><th>1201</th><th>1202</th><th>1203</th><th>1204</th><th>1205</th><th>1206</th><th>1207</th><th>1208</th><th>1209</th><th>1210</th><th>1211</th><th>1212</th><th>1213</th><th>1214</th><th>1215</th><th>1216</th><th>1217</th><th>1218</th><th>1219</th><th>1220</th><th>1221</th><th>1222</th><th>1223</th><th>1224</th><th>1225</th><th>1226</th><th>1227</th><th>1228</th><th>1229</th><th>1230</th><th>1231</th><th>1232</th><th>1233</th><th>1234</th><th>1235</th><th>1236</th><th>1237</th><th>1238</th><th>1239</th><th>1240</th><th>1241</th><th>1242</th><th>1243</th><th>1244</th><th>1245</th><th>1246</th><th>1247</th><th>1248</th><th>1249</th><th>1250</th><th>1251</th><th>1252</th><th>1253</th><th>1254</th><th>1255</th><th>1256</th><th>1257</th><th>1258</th><th>1259</th><th>1260</th><th>1261</th><th>1262</th><th>1263</th><th>1264</th><th>1265</th><th>1266</th><th>1267</th><th>1268</th><th>1269</th><th>1270</th><th>1271</th><th>1272</th><th>1273</th><th>1274</th><th>1275</th><th>1276</th><th>1277</th><th>1278</th><th>1279</th><th>1280</th><th>1281</th><th>1282</th><th>1283</th><th>1284</th><th>1285</th><th>1286</th><th>1287</th><th>1288</th><th>1289</th><th>1290</th><th>1291</th><th>1292</th><th>1293</th><th>1294</th><th>1295</th><th>1296</th><th>1297</th><th>1298</th><th>1299</th><th>1300</th><th>1301</th><th>1302</th><th>1303</th><th>1304</th><th>1305</th><th>1306</th><th>1307</th><th>1308</th><th>1309</th><th>1310</th><th>1311</th><th>1312</th><th>1313</th><th>1314</th><th>1315</th><th>1316</th><th>1317</th><th>1318</th><th>1319</th><th>1320</th><th>1321</th><th>1322</th><th>1323</th><th>1324</th><th>1325</th><th>1326</th><th>1327</th><th>1328</th><th>1329</th><th>1330</th><th>1331</th><th>1332</th><th>1333</th><th>1334</th><th>1335</th><th>1336</th><th>1337</th><th>1338</th><th>1339</th><th>1340</th><th>1341</th><th>1342</th><th>1343</th><th>1344</th><th>1345</th><th>1346</th><th>1347</th><th>1348</th><th>1349</th><th>1350</th><th>1351</th><th>1352</th><th>1353</th><th>1354</th><th>1355</th><th>1356</th><th>1357</th><th>1358</th><th>1359</th><th>1360</th><th>1361</th><th>1362</th><th>1363</th><th>1364</th><th>1365</th><th>1366</th><th>1367</th><th>1368</th><th>1369</th><th>1370</th><th>1371</th><th>1372</th><th>1373</th><th>1374</th><th>1375</th><th>1376</th><th>1377</th><th>1378</th><th>1379</th><th>1380</th><th>1381</th><th>1382</th><th>1383</th><th>1384</th><th>1385</th><th>1386</th><th>1387</th><th>1388</th><th>1389</th><th>1390</th><th>1391</th><th>1392</th><th>1393</th><th>1394</th><th>1395</th><th>1396</th><th>1397</th><th>1398</th><th>1399</th><th>1400</th><th>1401</th><th>1402</th><th>1403</th><th>1404</th><th>1405</th><th>1406</th><th>1407</th><th>1408</th><th>1409</th><th>1410</th><th>1411</th><th>1412</th><th>1413</th><th>1414</th><th>1415</th><th>1416</th><th>1417</th><th>1418</th><th>1419</th></tr></table>																								К	Семестр		Семестр		Семестр		Семестр		Семестр		Семестр		Семестр		Семестр		Семестр		Семестр		Семестр		Семестр		Итого	Итого	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150	151	152	153	154	155	156	157	158	159	160	161	162	163	164	165	166	167	168	169	170	171	172	173	174	175	176	177	178	179	180	181	182	183	184	185	186	187	188	189	190	191	192	193	194	195	196	197	198	199	200	201	202	203	204	205	206	207	208	209	210	211	212	213	214	215	216	217	218	219	220	221	222	223	224	225	226	227	228	229	230	231	232	233	234	235	236	237	238	239	240	241	242	243	244	245	246	247	248	249	250	251	252	253	254	255	256	257	258	259	260	261	262	263	264	265	266	267	268	269	270	271	272	273	274	275	276	277	278	279	280	281	282	283	284	285	286	287	288	289	290	291	292	293	294	295	296	297	298	299	300	301	302	303	304	305	306	307	308	309	310	311	312	313	314	315	316	317	318	319	320	321	322	323	324	325	326	327	328	329	330	331	332	333	334	335	336	337	338	339	340	341	342	343	344	345	346	347	348	349	350	351	352	353	354	355	356	357	358	359	360	361	362	363	364	365	366	367	368	369	370	371	372	373	374	375	376	377	378	379	380	381	382	383	384	385	386	387	388	389	390	391	392	393	394	395	396	397	398	399	400	401	402	403	404	405	406	407	408	409	410	411	412	413	414	415	416	417	418	419	420	421	422	423	424	425	426	427	428	429	430	431	432	433	434	435	436	437	438	439	440	441	442	443	444	445	446	447	448	449	450	451	452	453	454	455	456	457	458	459	460	461	462	463	464	465	466	467	468	469	470	471	472	473	474	475	476	477	478	479	480	481	482	483	484	485	486	487	488	489	490	491	492	493	494	495	496	497	498	499	500	501	502	503	504	505	506	507	508	509	510	511	512	513	514	515	516	517	518	519	520	521	522	523	524	525	526	527	528	529	530	531	532	533	534	535	536	537	538	539	540	541	542	543	544	545	546	547	548	549	550	551	552	553	554	555	556	557	558	559	560	561	562	563	564	565	566	567	568	569	570	571	572	573	574	575	576	577	578	579	580	581	582	583	584	585	586	587	588	589	590	591	592	593	594	595	596	597	598	599	600	601	602	603	604	605	606	607	608	609	610	611	612	613	614	615	616	617	618	619	620	621	622	623	624	625	626	627	628	629	630	631	632	633	634	635	636	637	638	639	640	641	642	643	644	645	646	647	648	649	650	651	652	653	654	655	656	657	658	659	660	661	662	663	664	665	666	667	668	669	670	671	672	673	674	675	676	677	678	679	680	681	682	683	684	685	686	687	688	689	690	691	692	693	694	695	696	697	698	699	700	701	702	703	704	705	706	707	708	709	710	711	712	713	714	715	716	717	718	719	720	721	722	723	724	725	726	727	728	729	730	731	732	733	734	735	736	737	738	739	740	741	742	743	744	745	746	747	748	749	750	751	752	753	754	755	756	757	758	759	760	761	762	763	764	765	766	767	768	769	770	771	772	773	774	775	776	777	778	779	780	781	782	783	784	785	786	787	788	789	790	791	792	793	794	795	796	797	798	799	800	801	802	803	804	805	806	807	808	809	810	811	812	813	814	815	816	817	818	819	820	821	822	823	824	825	826	827	828	829	830	831	832	833	834	835	836	837	838	839	840	841	842	843	844	845	846	847	848	849	850	851	852	853	854	855	856	857	858	859	860	861	862	863	864	865	866	867	868	869	870	871	872	873	874	875	876	877	878	879	880	881	882	883	884	885	886	887	888	889	890	891	892	893	894	895	896	897	898	899	900	901	902	903	904	905	906	907	908	909	910	911	912	913	914	915	916	917	918	919	920	921	922	923	924	925	926	927	928	929	930	931	932	933	934	935	936	937	938	939	940	941	942	943	944	945	946	947	948	949	950	951	952	953	954	955	956	957	958	959	960	961	962	963	964	965	966	967	968	969	970	971	972	973	974	975	976	977	978	979	980	981	982	983	984	985	986	987	988	989	990	991	992	993	994	995	996	997	998	999	1000	1001	1002	1003	1004	1005	1006	1007	1008	1009	1010	1011	1012	1013	1014	1015	1016	1017	1018	1019	1020	1021	1022	1023	1024	1025	1026	1027	1028	1029	1030	1031	1032	1033	1034	1035	1036	1037	1038	1039	1040	1041	1042	1043	1044	1045	1046	1047	1048	1049	1050	1051	1052	1053	1054	1055	1056	1057	1058	1059	1060	1061	1062	1063	1064	1065	1066	1067	1068	1069	1070	1071	1072	1073	1074	1075	1076	1077	1078	1079	1080	1081	1082	1083	1084	1085	1086	1087	1088	1089	1090	1091	1092	1093	1094	1095	1096	1097	1098	1099	1100	1101	1102	1103	1104	1105	1106	1107	1108	1109	1110	1111	1112	1113	1114	1115	1116	1117	1118	1119	1120	1121	1122	1123	1124	1125	1126	1127	1128	1129	1130	1131	1132	1133	1134	1135	1136	1137	1138	1139	1140	1141	1142	1143	1144	1145	1146	1147	1148	1149	1150	1151	1152	1153	1154	1155	1156	1157	1158	1159	1160	1161	1162	1163	1164	1165	1166	1167	1168	1169	1170	1171	1172	1173	1174	1175	1176	1177	1178	1179	1180	1181	1182	1183	1184	1185	1186	1187	1188	1189	1190	1191	1192	1193	1194	1195	1196	1197	1198	1199	1200	1201	1202	1203	1204	1205	1206	1207	1208	1209	1210	1211	1212	1213	1214	1215	1216	1217	1218	1219	1220	1221	1222	1223	1224	1225	1226	1227	1228	1229	1230	1231	1232	1233	1234	1235	1236	1237	1238	1239	1240	1241	1242	1243	1244	1245	1246	1247	1248	1249	1250	1251	1252	1253	1254	1255	1256	1257	1258	1259	1260	1261	1262	1263	1264	1265	1266	1267	1268	1269	1270	1271	1272	1273	1274	1275	1276	1277	1278	1279	1280	1281	1282	1283	1284	1285	1286	1287	1288	1289	1290	1291	1292	1293	1294	1295	1296	1297	1298	1299	1300	1301	1302	1303	1304	1305	1306	1307	1308	1309	1310	1311	1312	1313	1314	1315	1316	1317	1318	1319	1320	1321	1322	1323	1324	1325	1326	1327	1328	1329	1330	1331	1332	1333	1334	1335	1336	1337	1338	1339	1340	1341	1342	1343	1344	1345	1346	1347	1348	1349	1350	1351	1352	1353	1354	1355	1356	1357	1358	1359	1360	1361	1362	1363	1364	1365	1366	1367	1368	1369	1370	1371	1372	1373	1374	1375	1376	1377	1378	1379	1380	1381	1382	1383	1384	1385	1386	1387	1388	1389	1390	1391	1392	1393	1394	1395	1396	1397	1398	1399	1400	1401	1402	1403	1404	1405	1406	1407	1408	1409	1410	1411	1412	1413	1414	1415	1416	1417	1418	1419
К	Семестр		Семестр		Семестр		Семестр		Семестр		Семестр		Семестр		Семестр		Семестр		Семестр		Семестр		Семестр		Итого		Итого																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24		25		26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150	151	152	153	154	155	156	157	158	159	160	161	162	163	164	165	166	167	168	169	170	171	172	173	174	175	176	177	178	179	180	181	182	183	184	185	186	187	188	189	190	191	192	193	194	195	196	197	198	199	200	201	202	203	204	205	206	207	208	209	210	211	212	213	214	215	216	217	218	219	220	221	222	223	224	225	226	227	228	229	230	231	232	233	234	235	236	237	238	239	240	241	242	243	244	245	246	247	248	249	250	251	252	253	254	255	256	257	258	259	260	261	262	263	264	265	266	267	268	269	270	271	272	273	274	275	276	277	278	279	280	281	282	283	284	285	286	287	288	289	290	291	292	293	294	295	296	297	298	299	300	301	302	303	304	305	306	307	308	309	310	311	312	313	314	315	316	317	318	319	320	321	322	323	324	325	326	327	328	329	330	331	332	333	334	335	336	337	338	339	340	341	342	343	344	345	346	347	348	349	350	351	352	353	354	355	356	357	358	359	360	361	362	363	364	365	366	367	368	369	370	371	372	373	374	375	376	377	378	379	380	381	382	383	384	385	386	387	388	389	390	391	392	393	394	395	396	397	398	399	400	401	402	403	404	405	406	407	408	409	410	411	412	413	414	415	416	417	418	419	420	421	422	423	424	425	426	427	428	429	430	431	432	433	434	435	436	437	438	439	440	441	442	443	444	445	446	447	448	449	450	451	452	453	454	455	456	457	458	459	460	461	462	463	464	465	466	467	468	469	470	471	472	473	474	475	476	477	478	479	480	481	482	483	484	485	486	487	488	489	490	491	492	493	494	495	496	497	498	499	500	501	502	503	504	505	506	507	508	509	510	511	512	513	514	515	516	517	518	519	520	521	522	523	524	525	526	527	528	529	530	531	532	533	534	535	536	537	538	539	540	541	542	543	544	545	546	547	548	549	550	551	552	553	554	555	556	557	558	559	560	561	562	563	564	565	566	567	568	569	570	571	572	573	574	575	576	577	578	579	580	581	582	583	584	585	586	587	588	589	590	591	592	593	594	595	596	597	598	599	600	601	602	603	604	605	606	607	608	609	610	611	612	613	614	615	616	617	618	619	620	621	622	623	624	625	626	627	628	629	630	631	632	633	634	635	636	637	638	639	640	641	642	643	644	645	646	647	648	649	650	651	652	653	654	655	656	657	658	659	660	661	662	663	664	665	666	667	668	669	670	671	672	673	674	675	676	677	678	679	680	681	682	683	684	685	686	687	688	689	690	691	692	693	694	695	696	697	698	699	700	701	702	703	704	705	706	707	708	709	710	711	712	713	714	715	716	717	718	719	720	721	722	723	724	725	726	727	728	729	730	731	732	733	734	735	736	737	738	739	740	741	742	743	744	745	746	747	748	749	750	751	752	753	754	755	756	757	758	759	760	761	762	763	764	765	766	767	768	769	770	771	772	773	774	775	776	777	778	779	780	781	782	783	784	785	786	787	788	789	790	791	792	793	794	795	796	797	798	799	800	801	802	803	804	805	806	807	808	809	810	811	812	813	814	815	816	817	818	819	820	821	822	823	824	825	826	827	828	829	830	831	832	833	834	835	836	837	838	839	840	841	842	843	844	845	846	847	848	849	850	851	852	853	854	855	856	857	858	859	860	861	862	863	864	865	866	867	868	869	870	871	872	873	874	875	876	877	878	879	880	881	882	883	884	885	886	887	888	889	890	891	892	893	894	895	896	897	898	899	900	901	902	903	904	905	906	907	908	909	910	911	912	913	914	915	916	917	918	919	920	921	922	923	924	925	926	927	928	929	930	931	932	933	934	935	936	937	938	939	940	941	942	943	944	945	946	947	948	949	950	951	952	953	954	955	956	957	958	959	960	961	962	963	964	965	966	967	968	969	970	971	972	973	974	975	976	977	978	979	980	981	982	983	984	985	986	987	988	989	990	991	992	993	994	995	996	997	998	999	1000	1001	1002	1003	1004	1005	1006	1007	1008	1009	1010	1011	1012	1013	1014	1015	1016	1017	1018	1019	1020	1021	1022	1023	1024	1025	1026	1027	1028	1029	1030	1031	1032	1033	1034	1035	1036	1037	1038	1039	1040	1041	1042	1043	1044	1045	1046	1047	1048	1049	1050	1051	1052	1053	1054	1055	1056	1057	1058	1059	1060	1061	1062	1063	1064	1065	1066	1067	1068	1069	1070	1071	1072	1073	1074	1075	1076	1077	1078	1079	1080	1081	1082	1083	1084	1085	1086	1087	1088	1089	1090	1091	1092	1093	1094	1095	1096	1097	1098	1099	1100	1101	1102	1103	1104	1105	1106	1107	1108	1109	1110	1111	1112	1113	1114	1115	1116	1117	1118	1119	1120	1121	1122	1123	1124	1125	1126	1127	1128	1129	1130	1131	1132	1133	1134	1135	1136	1137	1138	1139	1140	1141	1142	1143	1144	1145	1146	1147	1148	1149	1150	1151	1152	1153	1154	1155	1156	1157	1158	1159	1160	1161	1162	1163	1164	1165	1166	1167	1168	1169	1170	1171	1172	1173	1174	1175	1176	1177	1178	1179	1180	1181	1182	1183	1184	1185	1186	1187	1188	1189	1190	1191	1192	1193	1194	1195	1196	1197	1198	1199	1200	1201	1202	1203	1204	1205	1206	1207	1208	1209	1210	1211	1212	1213	1214	1215	1216	1217	1218	1219	1220	1221	1222	1223	1224	1225	1226	1227	1228	1229	1230	1231	1232	1233	1234	1235	1236	1237	1238	1239	1240	1241	1242	1243	1244	1245	1246	1247	1248	1249	1250	1251	1252	1253	1254	1255	1256	1257	1258	1259	1260	1261	1262	1263	1264	1265	1266	1267	1268	1269	1270	1271	1272	1273	1274	1275	1276	1277	1278	1279	1280	1281	1282	1283	1284	1285	1286	1287	1288	1289	1290	1291	1292	1293	1294	1295	1296	1297	1298	1299	1300	1301	1302	1303	1304	1305	1306	1307	1308	1309	1310	1311	1312	1313	1314	1315	1316	1317	1318	1319	1320	1321	1322	1323	1324	1325	1326	1327	1328	1329	1330	1331	1332	1333	1334	1335	1336	1337	1338	1339	1340	1341	1342	1343	1344	1345	1346	1347	1348	1349	1350	1351	1352	1353	1354	1355	1356	1357	1358	1359	1360	1361	1362	1363	1364	1365	1366	1367	1368	1369	1370	1371	1372	1373	1374	1375	1376	1377	1378	1379	1380	1381	1382	1383	1384	1385	1386	1387	1388	1389	1390	1391	1392	1393	1394	1395	1396	1397	1398	1399	1400	1401	1402	1403	1404	1405	1406	1407	1408	1409	1410	1411	1412	1413	1414	1415	1416	1417	1418	1419																																																		

4.4 Базовая учебная программа по дисциплине «Математическое моделирование производственных процессов» для специальности 1-37 01 01 «Двигатели внутреннего сгорания»

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе

_____ **Г. А. Вершина**

" 15 " марта 2010 г.

Регистрационный № УД-АТФ16-34 / баз.

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ**

**Учебная программа для специальности:
1-37.01.01 «Двигатели внутреннего сгорания»**

Минск 2010

СОСТАВИТЕЛЬ:

В.А.Бармин, доцент кафедры “Двигатели внутреннего сгорания”, к.т.н., доцент

РЕЦЕНЗЕНТЫ:

Л.А.Молибошко, доцент кафедры «Автомобили» Белорусского национального технического университета”, к.т.н., доцент

Е.В.Буко, старший преподаватель кафедры «Техническая эксплуатация воздушных судов и двигателей» Минского государственного высшего авиационного колледжа

РЕКОМЕНДОВАНА К УТВЕРЖДЕНИЮ:

Кафедрой “Двигатели внутреннего сгорания” Белорусского национального технического университета
(протокол № 19 от 03 марта 2010г.)

Методической комиссией автотракторного факультета Белорусского национального технического университета
(протокол № 6 от 12 марта 2010г.)

Ответственный за редакцию: В.А.Бармин

Ответственный за выпуск: В.А.Бармин

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Учебная программа «Математическое моделирование производственных процессов» разработана в соответствии с Образовательным стандартом 2008г., для специальности 1-37.01.01 «Двигатели внутреннего сгорания» высших учебных заведений утвержденным и введенным в действие постановлением Минобразования РБ 28.08.2008г. №77, и учебным планом утверждённым ректором БНТУ «9» июля 2008г., разработанным на основании Образовательного стандарта.

Целью изучения дисциплины является изучение будущими специалистами по конструированию и эксплуатации двигателей внутреннего сгорания вопросов теории моделирования, методов математического моделирования двигателей внутреннего сгорания на микро-, макро-, и метауровнях и технологии разработки моделей.

Задачами изучения дисциплины являются: знакомство с основными понятиями теории моделирования, классификацией, структурой и формой представления математических моделей, а также требованиями к ним; освоение технологии моделирования, включающей этапы определения целей и задач моделирования, описание объекта моделирования, составление содержательного описания или концептуальной модели, преобразование формального описания в математическую модель, программирование, испытание и эксплуатация модели, определение основных типовых моделей двигателей внутреннего сгорания и способов их реализации на компьютере; овладение навыками проведения вычислительных экспериментов и анализа результатов моделирования. В результате изучения дисциплины будущий специалист должен иметь представление об основных методах математического моделирования; знать к какому уровню моделирования относится разрабатываемая математическая модель и использовать соответствующий математический аппарат; владеть приёмами создания математических моделей; уметь правильно сформулировать цель разработки математической модели, её структуру, алгоритм функционирования, провести вычислительный эксперимент и оценить полученные результаты.

Дисциплина базируется на знаниях, полученных студентами при изучении общенаучных, общепрофессиональных и специальных дисциплин: «Математика», «Физика», «Информатика», «Теоретическая механика», «Термодинамика и теплопередача» и др.

В результате освоения курса «Математическое моделирование производственных процессов» студент должен:

знать:

- к какому уровню моделирования относится разрабатываемая математическая модель;
- какой математический аппарат используется при создании математической модели;
- как составить алгоритм и программу разрабатываемой модели;
- технологию разработки модели и её основные этапы;

- как оценить адекватность модели по полученным результатам;
- как упростить разработанную модель, без снижения точности полученных результатов;

уметь:

- реализовать разработанную математическую модель на алгоритмическом языке или известных компьютерных программах для решения инженерных задач;
- правильно оценить полученные результаты при моделировании;

уметь анализировать:

- процесс моделирования и своевременно вносить коррективы в него;
- результаты моделирования;

приобрести навыки:

- создания математической модели;
- реализации математической модели на компьютере.

Характеристика рекомендуемых методов и технологий обучения

С целью активизации познавательной деятельности студентов используются методы, способствующие качественному и полному пониманию и усвоению учебного материала.

Теоретические лекционные занятия чередуются с лабораторными работами, а также с управляемой самостоятельной работой студентов при выполнении ими курсовой работы.

При проведении занятий используются информационные технологии и различные педагогические приёмы. При изложении материала соблюдается единство терминологий и обозначений в соответствии с действующими стандартами и системой измерений СИ.

Организация самостоятельной работы студентов

При изучении дисциплины используются формы самостоятельной работы: контролируемая самостоятельная работа в виде решения индивидуальных заданий на компьютере во время проведения лабораторных занятий под контролем преподавателя в соответствии с расписанием; подготовка математических моделей по индивидуальным заданиям.

Диагностика компетенций студента

Оценка уровня знаний студента при защите курсовой работы производится по десятибальной шкале в соответствии с критериями, утверждёнными Министерством образования РБ.

Оценка промежуточных учебных достижений студента также осуществляется по десятибальной шкале.

Для оценки достижений студента используется следующий диагностический инструментарий:

защита выполненных на лабораторных занятиях индивидуальных заданий;

защита курсовой работы;
сдача зачёта по дисциплине.

Изучение курса «Математическое моделирование производственных процессов» рассчитано на 100 часов, в том числе – 68 часов аудиторных занятий.

Распределение аудиторных часов по видам занятий:

лекции – 34 часа;

лабораторные работы – 34 часа.

Примерный тематический план курса

Наименование темы	Лекции (часы)	Лабораторные занятия (часы)	Всего аудиторных часов
1	2	3	4
Тема 1. Введение. Основные понятия моделирования	6		6
Тема 2. Математические модели	6		6
Тема 3. Технология моделирования	6		6
Тема 4. Типовые модели элементов ДВС. Моделирование элементов ДВС на микроуровне	6	20	26
Тема 5. Моделирование элементов ДВС на макроуровне	4	14	18
Тема 6. Моделирование элементов ДВС на метауровне	4		4
Тема 7. Статистические модели	2		2
ВСЕГО	34	34	68

СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Тема 1. Введение. Основные понятия моделирования.

Понятия объекта и модели. Из истории развития моделирования. Классификация моделей. Системное представление в моделировании. Моделирование в процессе проектирования технических систем.

Тема 2. Математические модели.

Понятие математической модели. Классификация математических моделей. Структура математических моделей. Форма представления математических моделей. Требования к математическим моделям. Объекты математического моделирования.

Тема 3. Технология моделирования.

Определение целей и задач моделирования. Определение объекта моделирования. Составление содержательного описания. Составление концептуальной модели. Составление формального описания. Преобразование формального описания в математическую модель.

Алгоритмизация и программирование модели. Испытание математической модели. Исследование свойств математической модели. Упрощение модели. Вычислительный эксперимент. Эксплуатация модели.

Тема 4. Типовые модели элементов ДВС. Моделирование элементов ДВС на микроуровне.

Предпосылки разработки математических моделей на микроуровне. Уравнение переноса субстанции. Уравнение энергии. Механика упругого твердого тела. Механика жидкости и газа. Моделирование теплового состояния. Численные методы решения для моделирования элементов ДВС на микроуровне. Метод сеток. Метод конечных элементов.

Тема 5. Моделирование элементов ДВС на макроуровне.

Предпосылки разработки моделей на макроуровне. Моделирования механических поступательных и вращательных систем.

Тема 6. Моделирование элементов ДВС на метауровне.

Предпосылки разработки математических моделей на метауровне. Моделирование автоматического управления системами и механизмами ДВС.

Тема 7. Статистические модели.

Корреляционный и регрессионный анализ. Разработка регрессионной модели. Планирование эксперимента. Обработка результатов эксперимента.

ИНФОРМАЦИОННО – МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Тарасик, В.П. Математическое моделирование технических систем: учебник для вузов /В.П.Тарасик. - Минск: Technika, 2004. – 640 с.
2. Зарубин, В.С. Математическое моделирование в технике: учебник для втузов /В.С.Зарубин.- М.: Издательство МГТУ, 2001. – 495с.
- Волков, И. К. Исследование операций: учебник для втузов /И.К.Волков, Е.А.Загоруйко. – 2-е изд. – М.: Издательство МГТУ, 2002. – 435с.
3. Селиванов, В.В Аналитические методы механики сплошной среды: учебное пособие для технических университетов и машиностроительных вузов /В.В.Селиванов, В.С.Зарубин, В.Н.Ионов. – М.: Издательство МГТУ, 1994. – 384с.

4. Альсевич, Л.А. Математическое моделирование. Определённый интеграл в приложениях. Задачи на экстремум: учебно – методическое пособие /Л.А.Альсевич. – Минск: Издательство БГУ, 2003. – 39с.
5. Ванько, В.И. Вариационное исчисление и оптимальное управление: учебник для втузов /В.И.Ванько, О.В.Ермошина, Г.Н.Кувыркин. – М.: Издательство МГТУ, 1999. – 487с.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Сидорик, В.В. Математическое моделирование в среде MatLав: учебно – методическое пособие для системы повышения квалификации, переподготовки и студентов /В.В.Сидорик. – Минск: БНТУ, 2008. – 111с.
2. Шахов, В.В. Методическое пособие по дисциплине «Математические модели в расчётах на ЭВМ» для студентов специальности 15.01. «Двигатели внутреннего сгорания» /В.В.Шахов. – Минск: БГПА, 1992. – 89с.
3. САПР: Система автоматизированного проектирования: учебное пособие для вузов. В 9 кн. Кн. 4. Математические модели технических объектов/В.А.Трудоношин, Н.В. Пивоварова; под. ред. И.И.Норенкова. – Минск: Высшая школа, 1988. – 159с.1
4. Юдаев, Б.Н. Техническая термодинамика: Теплопередача: учебник для не-энергетических специальностей втузов /Б.Н.Юдаев. – М.: Высшая школа, 1988. – 479с.
5. Круглов, М.Г. Газовая динамика комбинированных двигателей внутреннего сгорания: учебное пособие для студентов, обучающихся по специальности «Двигатели внутреннего сгорания» /М.Г.Круглов, А.А.Меднов. – М.: Машиностроение, 1988. – 360с.
6. Чистяков, В.К. Динамика поршневых и комбинированных двигателей внутреннего сгорания: учебное пособие для машиностроительных вузов по специальности «Двигатели внутреннего сгорания» /В.К.Чистяков. - М.: Машиностроение, 1989. – 416с.

КОМПЬЮТЕРНЫЕ ПРОГРАММЫ И ДРУГИЕ НАУЧНО – МЕТОДИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

Алгоритмические языки – Turbo Pascal и другие
Приложения Windows – Excel, MathCad, MatLab и другие.

ПРИМЕРНЫЙ ПЕРЕЧЕНЬ ТЕМ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

1. Моделирование кинематической характеристики кривошипно– шатунного механизма ДВС.
2. Моделирование кинематической характеристики газораспределительного механизма.
3. Моделирование напряжённого состояния стержня.
4. Моделирование термодинамических циклов поршневых ДВС.

5. Моделирование термодинамических циклов газотурбинной установки и реактивных двигателей.
6. Моделирование теплопередачи в многослойной цилиндрической стенке.
7. Моделирование внешней скоростной характеристики поршневых ДВС.

ПРИМЕРНЫЙ ПЕРЕЧЕНЬ ТЕМ КУРСОВЫХ РАБОТ

1. Моделирование скоростной характеристики «Разгон – выбег» автомобиля.
2. Моделирование напряжённого состояния деталей ДВС методом конечных элементов.
3. Моделирование теплового состояния деталей ДВС методом конечных элементов.
4. Моделирование газовых потоков проточных элементов ДВС.
5. Моделирование рабочих процессов методом конечных разностей.

4.5 Рабочая учебная программа по дисциплине «Математическое моделирование производственных процессов» для специальности 1-37 01 01 «Двигатели внутреннего сгорания»

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УТВЕРЖДАЮ

Декан автотракторного факультета

_____ В. В. Равино

" 15 " ноября 2010 г.

Регистрационный № УД - АТФ16 - 01/р.

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ**

**Учебная программа для специальности:
1-37.01.01 «Двигатели внутреннего сгорания»**

Факультет автотракторный

Кафедра «Двигатели внутреннего сгорания»

Курс третий (пятый)

Семестр пятый (десятый)

Лекции 34 (8) часа

Экзамен _____ (10) _____

Практические занятия 0 (4) часов

Зачёт пятый семестр

Лабораторные занятия 34 (6) часа

Курсовая работа пятый
(десятый) семестр

Всего аудиторных часов по дисциплине 68 (18) часов

Всего часов по дисциплине 100 (100) часов

Форма получения высшего образования дневная (заочная)

Составил В.А.Бармин, к.т.н., доцент

Минск 2010

Учебная программа составлена на основе учебной программы вузовского компонента, дата утверждения - 15 марта 2010г., регистрационный номер - УД – АТФ16 – 34/баз.

Рассмотрена и рекомендована к утверждению в качестве рабочего варианта на заседании кафедры «Двигатели внутреннего сгорания»

(9 ноября 2010 г., протокол № 4)

Заведующий кафедрой

_____ Г.М.Кухарёнок

Одобрена и рекомендована к утверждению Методической комиссией автотракторного факультета Белорусского национального технического университета

(12 ноября 2010 г., протокол № 3)

Председатель

_____ В.П.Автушко

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Учебная программа «Математическое моделирование производственных процессов» разработана в соответствии с Образовательным стандартом 2008г., для специальности 1-37.01.01 «Двигатели внутреннего сгорания» высших учебных заведений утвержденным и введенным в действие постановлением Минобразования РБ 28.08.2008г. №77, и учебным планом утверждённым ректором БНТУ «9» июля 2008г., разработанным на основании Образовательного стандарта.

Целью изучения дисциплины является изучение будущими специалистами по конструированию и эксплуатации двигателей внутреннего сгорания вопросов теории моделирования, методов математического моделирования двигателей внутреннего сгорания на микро-, макро-, и метауровнях и технологии разработки моделей.

Задачами изучения дисциплины являются: знакомство с основными понятиями теории моделирования, классификацией, структурой и формой представления математических моделей, а также требованиями к ним; освоение технологии моделирования, включающей этапы определения целей и задач моделирования, описание объекта моделирования, составление содержательного описания или концептуальной модели, преобразование формального описания в математическую модель, программирование, испытание и эксплуатация модели, определение основных типовых моделей двигателей внутреннего сгорания и способов их реализации на компьютере; овладение навыками проведения вычислительных экспериментов и анализа результатов моделирования. В результате изучения дисциплины будущий специалист должен иметь представление об основных методах математического моделирования; знать к какому уровню моделирования относится разрабатываемая математическая модель и использовать соответствующий математический аппарат; владеть приёмами создания математических моделей; уметь правильно сформулировать цель разработки математической модели, её структуру, алгоритм функционирования, провести вычислительный эксперимент и оценить полученные результаты.

Дисциплина базируется на знаниях, полученных студентами при изучении общенаучных, общепрофессиональных и специальных дисциплин: «Математика», «Физика», «Информатика», «Теоретическая механика», «Термодинамика и теплопередача» и др.

В результате освоения курса «Математическое моделирование производственных процессов» студент должен:

знать:

- к какому уровню моделирования относится разрабатываемая математическая модель;
- какой математический аппарат используется при создании математической модели;
- как составить алгоритм и программу разрабатываемой модели;
- технологию разработки модели и её основные этапы;

- как оценить адекватность модели по полученным результатам;
- как упростить разработанную модель, без снижения точности полученных результатов;

уметь:

- реализовать разработанную математическую модель на алгоритмическом языке или известных компьютерных программах для решения инженерных задач;
- правильно оценить полученные результаты при моделировании;

уметь анализировать:

- процесс моделирования и своевременно вносить коррективы в него;
- результаты моделирования;

приобрести навыки:

- создания математической модели;
- реализации математической модели на компьютере.

Характеристика рекомендуемых методов и технологий обучения

С целью активизации познавательной деятельности студентов используются методы, способствующие качественному и полному пониманию и усвоению учебного материала.

Теоретические лекционные занятия чередуются с лабораторными работами, а также с управляемой самостоятельной работой студентов при выполнении ими курсовой работы.

При проведении занятий используются информационные технологии и различные педагогические приёмы. При изложении материала соблюдается единство терминологий и обозначений в соответствии с действующими стандартами и системой измерений СИ.

Организация самостоятельной работы студентов

При изучении дисциплины используются формы самостоятельной работы: контролируемая самостоятельная работа в виде решения индивидуальных заданий на компьютере во время проведения лабораторных занятий под контролем преподавателя в соответствии с расписанием; подготовка математических моделей по индивидуальным заданиям.

Диагностика компетенций студента

Оценка уровня знаний студента при защите курсовой работы производится по десятибальной шкале в соответствии с критериями, утверждёнными Министерством образования РБ.

Оценка промежуточных учебных достижений студента также осуществляется по десятибальной шкале.

Для оценки достижений студента используется следующий диагностический инструментарий:

защита выполненных на лабораторных занятиях индивидуальных заданий;

защита курсовой работы;
сдача зачёта по дисциплине.

Изучение курса «Математическое моделирование производственных процессов» рассчитано на 100 (100) часов, в том числе – 68 (22) часов аудиторных занятий.

Распределение аудиторных часов по видам занятий:

- лекции – 34 (8) часа;
- лабораторные работы – 34 (6) часа;
- практические работы – 0 (4) часов.

Примерный тематический план курса

Наименование темы	Лекции (часы)	Лабораторные занятия (часы)	Всего аудиторных часов
1	2	3	4
Тема 1. Введение. Основные понятия моделирования	6		6
Тема 2. Математические модели	6		6
Тема 3. Технология моделирования	6 (2)		6 (2)
Тема 4. Типовые модели элементов ДВС. Моделирование элементов ДВС на микроуровне	6 (2)	8 (2)	14 (4)
Тема 5. Моделирование элементов ДВС на макроуровне	4 (2)	18 (2)	22 (4)
Тема 6. Моделирование элементов ДВС на метауровне	4 (2)	8 (2)	12 (4)
Тема 7. Статистические модели	2		2
ВСЕГО	34 (8)	34 (6)	68 (18)

СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Тема 1. Введение. Основные понятия моделирования.

Понятия объекта и модели. Из истории развития моделирования. Классификация моделей. Системное представление в моделировании. Моделирование в процессе проектирования технических систем.

Тема 2. Математические модели.

Понятие математической модели. Классификация математических моделей. Структура математических моделей. Форма представления математических моделей. Требования к математическим моделям. Объекты математического моделирования.

Тема 3. Технология моделирования.

Определение целей и задач моделирования. Определение объекта моделирования. Составление содержательного описания. Составление концептуальной модели. Составление формального описания. Преобразование формального описания в математическую модель.

Алгоритмизация и программирование модели. Испытание математической модели. Исследование свойств математической модели. Упрощение модели. Вычислительный эксперимент. Эксплуатация модели.

Тема 4. Типовые модели элементов ДВС. Моделирование элементов ДВС на микроуровне.

Предпосылки разработки математических моделей на микроуровне. Уравнение переноса субстанции. Уравнение энергии. Механика упругого твердого тела. Механика жидкости и газа. Моделирование теплового состояния. Численные методы решения для моделирования элементов ДВС на микроуровне. Метод сеток. Метод конечных элементов.

Тема 5. Моделирование элементов ДВС на макроуровне.

Предпосылки разработки моделей на макроуровне. Моделирования механических поступательных и вращательных систем.

Тема 6. Моделирование элементов ДВС на метауровне.

Предпосылки разработки математических моделей на метауровне. Моделирование автоматического управления системами и механизмами ДВС.

Тема 7. Статистические модели.

Корреляционный и регрессионный анализ. Разработка регрессионной модели. Планирование эксперимента. Обработка результатов эксперимента.

УЧЕБНО – МЕТОДИЧЕСКАЯ КАРТА

Номер раздела, темы, занятия	Название раздела, темы, занятия: перечень изучаемых вопросов	Количество аудиторных часов				Материальное обеспечение занятий	Литература	Форма контроля знаний
		лекции	практические занятия	лабораторные занятия	самостоятельная работа			
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Введение. Основные понятия моделирования (6 ч)	6					(1, 2)	
1.1	Понятия объекта и модели. Из истории развития моделирования.	2						
1.2	Классификация моделей.	2						
1.3	Системное представление в моделировании. Моделирование в процессе проектирования технических систем.	2						
2	Математические модели (6 ч)	6					(1, 2)	
2.1	Понятие математической модели. Классификация математических моделей	2						
2.2	Структура математических моделей. Форма представления математических моделей	2						
2.3	Требования к математическим моделям. Объекты математического моделирования	2						
3	Технология моделирования (6 ч)	6(2)					(1, 2, 3)	
3.1	Определение целей и задач моделирования. Определение объекта моделирования. Составление содержательного описания. Составление концептуальной модели	2						
3.2	Составление формального описания. Преобразование формального описания в математическую модель. Алгоритмизация и программирование модели. Испытание математической модели.	2						
3.3	Исследование свойств математической модели. Упрощение модели. Вычислительный эксперимент. Эксплуатация модели	2						
4	Типовые модели элементов ДВС. Моделирование элементов ДВС на микроуровне (14 ч)	6 (2)	(2)	8 (2)			(1, 2, 4)	
4.1	Предпосылки разработки математических моделей на микроуровне. Уравнение переноса субстанции. Уравнение	2						

	энергии							
1	2	3	4	5	6	7	8	9
4.2	Механика упругого твердого тела. Механика жидкости и газа. Моделирование теплового состояния	2						
4.3	Численные методы решения для моделирования элементов ДВС на микроуровне. Метод сеток. Метод конечных элементов	2						
4.4	Моделирование элементов ДВС на микроуровне			8		Компьютеры и программы		Защита лаб. работ
5	Моделирование элементов ДВС на макроуровне (22 ч)	4 (2)	(2)	18 (2)			(1, 2, 5)	
5.1	Предпосылки разработки моделей на макроуровне	2						
5.2	Моделирования механических поступательных и вращательных систем	2						
5.3	Моделирование элементов ДВС на макроуровне			18		Компьютеры и программы		Защита лаб. работ
6	Моделирование элементов ДВС на метауровне (12 ч)	4(2)		8 (2)			(1, 2, 6)	
6.1	Предпосылки разработки математических моделей на метауровне	2						
6.2	Моделирование автоматического управления системами и механизмами ДВС	2						
6.3	Моделирование элементов ДВС на метауровне			8		Компьютеры и программы		Защита лаб. работ
7	Статистические модели (2 ч)	2					(1, 2)	
7.1	Корреляционный и регрессионный анализ. Разработка регрессионной модели. Планирование эксперимента. Обработка результатов эксперимента	2						

ИНФОРМАЦИОННО – МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Тарасик, В.П. Математическое моделирование технических систем: учебник для вузов /В.П.Тарасик. - Минск: Technika, 2004. – 640 с.
2. Зарубин, В.С. Математическое моделирование в технике: учебник для вузов /В.С.Зарубин.- М.: Издательство МГТУ, 2001. – 495с.
3. Волков, И. К. Исследование операций: учебник для вузов /И.К.Волков, Е.А.Загоруйко. – 2-е изд. – М.: Издательство МГТУ, 2002. – 435с.
4. Селиванов, В.В Аналитические методы механики сплошной среды: учебное пособие для технических университетов и машиностроительных вузов /В.В.Селиванов, В.С.Зарубин, В.Н.Ионов. – М.: Издательство МГТУ, 1994. – 384с.
5. Альсевич, Л.А. Математическое моделирование. Определённый интеграл в приложениях. Задачи на экстремум: учебно – методическое пособие /Л.А.Альсевич. – Минск: Издательство БГУ, 2003. – 39с.
6. Ванько, В.И. Вариационное исчисление и оптимальное управление: учебник для вузов /В.И.Ванько, О.В.Ермошина, Г.Н.Кувыркин. – М.: Издательство МГТУ, 1999. – 487с.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Сидорик, В.В. Математическое моделирование в среде MatLab: учебно – методическое пособие для системы повышения квалификации, переподготовки и студентов /В.В.Сидорик. – Минск: БНТУ, 2008. – 111с.
2. Шахов, В.В. Методическое пособие по дисциплине «Математические модели в расчётах на ЭВМ» для студентов специальности 15.01. «Двигатели внутреннего сгорания» /В.В.Шахов. – Минск: БГПА, 1992. – 89с.
3. САПР: Система автоматизированного проектирования: учебное пособие для вузов. В 9 кн. Кн. 4. Математические модели технических объектов/В.А.Трудоношин, Н.В. Пивоварова; под. ред. И.И.Норенкова. – Минск: Высшая школа, 1988. – 159с.1
4. Юдаев, Б.Н. Техническая термодинамика: Теплопередача: учебник для неэнергетических специальностей вузов /Б.Н.Юдаев. – М.: Высшая школа, 1988. – 479с.
5. Круглов, М.Г. Газовая динамика комбинированных двигателей внутреннего сгорания: учебное пособие для студентов, обучающихся по специальности «Двигатели внутреннего сгорания» /М.Г.Круглов, А.А.Меднов. – М.: Машиностроение, 1988. – 360с.
6. Чистяков, В.К. Динамика поршневых и комбинированных двигателей внутреннего сгорания: учебное пособие для машиностроительных вузов по специальности «Двигатели внутреннего сгорания» /В.К.Чистяков. - М.: Машиностроение, 1989. – 416с.

7. Математическое моделирование производственных процессов: лабораторные работы для студентов специальности 1 – 37 01 01 «Двигатели внутреннего сгорания» / сост.: В.А.Бармин, А.В.Предко. – Минск: БНТУ, 2010. – 42 с.

КОМПЬЮТЕРНЫЕ ПРОГРАММЫ И ДРУГИЕ НАУЧНО – МЕТОДИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

1. Алгоритмические языки – Turbo Pascal и другие
2. Приложения Windows – Excel, MathCad, MatLab и другие.

ПРИМЕРНЫЙ ПЕРЕЧЕНЬ ТЕМ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

1. Моделирование кинематической характеристики кривошипно– шатунного механизма ДВС.
2. Моделирование кинематической характеристики газораспределительного механизма.
3. Моделирование напряжённого состояния стержня.
4. Моделирование термодинамических циклов поршневых ДВС.
5. Моделирование термодинамических циклов газотурбинной установки и реактивных двигателей.
6. Моделирование теплопередачи в многослойной цилиндрической стенке.
7. Моделирование внешней скоростной характеристики поршневых ДВС.

ПРИМЕРНЫЙ ПЕРЕЧЕНЬ ТЕМ КУРСОВЫХ РАБОТ

1. Моделирование скоростной характеристики «Разгон – выбег» автомобиля.
2. Моделирование напряжённого состояния деталей ДВС методом конечных элементов.
3. Моделирование теплового состояния деталей ДВС методом конечных элементов.
4. Моделирование газовых потоков проточных элементов ДВС.
5. Моделирование рабочих процессов методом конечных разностей.

**ДОПОЛНЕНИЯ И ИЗМЕНЕНИЯ К УЧЕБНОЙ ПРОГРАММЕ
ПО ИЗУЧАЕМОЙ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЕ**
на 2012/2013 учебный год

№№ пп	Дополнения и изменения	Основание

Учебная программа пересмотрена и одобрена на заседании кафедры «Двигатели внутреннего сгорания» (протокол № 9 от 12.12. 2012 г.)

Заведующий кафедрой,
д.т.н., профессор

Г.М.Кухарёнок

УТВЕРЖДАЮ
Декан автотракторного факультета,
д.т.н., доцент

А.Г.Баханович

4.6 Список рекомендуемой литературы

ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Тарасик, В.П. Математическое моделирование технических систем: учебник для вузов /В.П.Тарасик. - Минск: Technika, 2004. – 640 с.
2. Зарубин, В.С. Математическое моделирование в технике: учебник для вузов /В.С.Зарубин.- М.: Издательство МГТУ, 2001. – 495с.
3. Волков, И. К. Исследование операций: учебник для вузов /И.К.Волков, Е.А.Загоруйко. – 2-е изд. – М.: Издательство МГТУ, 2002. – 435с.
4. Селиванов, В.В Аналитические методы механики сплошной среды: учебное пособие для технических университетов и машиностроительных вузов /В.В.Селиванов, В.С.Зарубин, В.Н.Ионов. – М.: Издательство МГТУ, 1994. – 384с.
5. Альсевич, Л.А. Математическое моделирование. Определённый интеграл в приложениях. Задачи на экстремум: учебно – методическое пособие /Л.А.Альсевич. – Минск: Издательство БГУ, 2003. – 39с.
6. Ванько, В.И. Вариационное исчисление и оптимальное управление: учебник для вузов /В.И.Ванько, О.В.Ермошина, Г.Н.Кувыркин. – М.: Издательство МГТУ, 1999. – 487с.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Сидорик, В.В. Математическое моделирование в среде MatLab: учебно – методическое пособие для системы повышения квалификации, переподготовки и студентов /В.В.Сидорик. – Минск: БНТУ, 2008. – 111с.
2. Шахов, В.В. Методическое пособие по дисциплине «Математические модели в расчётах на ЭВМ» для студентов специальности 15.01. «Двигатели внутреннего сгорания» /В.В.Шахов. – Минск: БГПА, 1992. – 89с.
3. САПР: Система автоматизированного проектирования: учебное пособие для вузов. В 9 кн. Кн. 4. Математические модели технических объектов/В.А.Трудоношин, Н.В. Пивоварова; под. ред. И.И.Норенкова. – Минск: Высшая школа, 1988. – 159с.1
4. Юдаев, Б.Н. Техническая термодинамика: Теплопередача: учебник для неэнергетических специальностей вузов /Б.Н.Юдаев. – М.: Высшая школа, 1988. – 479с.
5. Круглов, М.Г. Газовая динамика комбинированных двигателей внутреннего сгорания: учебное пособие для студентов, обучающихся по специальности «Двигатели внутреннего сгорания» /М.Г.Круглов, А.А.Меднов. – М.: Машиностроение, 1988. – 360с.
6. Чистяков, В.К. Динамика поршневых и комбинированных двигателей внутреннего сгорания: учебное пособие для машиностроительных вузов по специальности «Двигатели внутреннего сгорания» /В.К.Чистяков. - М.: Машиностроение, 1989. – 416с.

7. Математическое моделирование производственных процессов: лабораторные работы для студентов специальности 1 – 37 01 01 «Двигатели внутреннего сгорания» / сост.: В.А.Бармин, А.В.Предко. – Минск: БНТУ, 2010. – 42 с.