

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
Высшего профессионального образования
«Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»
(ВлГУ)

Институт машиностроения и автомобильного транспорта

Кафедра Тепловые двигатели и энергетические установки

Методические рекомендации к самостоятельной работе
по дисциплине «Моделирование процессов в поршневых двигателях»
для студентов ВлГУ, обучающихся по направлению 141100 .68 -
Энергомашиностроение

Владимир 2016

Модуль 1. Общие принципы моделирования физических процессов

Самостоятельная проработка материала по темам первого модуля осуществляется по учебникам (учебным пособиям) ([1], стр. 97...142; стр. 565...593); ([5], стр. 173...178; 243...245).

Изучаемые темы:

1. Понятие модели, их виды (классификация). Требования к математическим моделям.
2. Квазистационарные (одно, двух и много зонные) модели процессов в поршневых двигателях. Расчётные схемы. Принятие начальных и граничных условий.
3. Одномерные математические модели. Краткие сведения о двухмерных и трёхмерных моделях. Их возможности, способы решения систем уравнений.
4. Выбор типа модели для решения конкретной задачи.

Основные вопросы для самоконтроля:

1. Определение модели, её назначение.
2. Роль моделей в исследовании физических процессов и оптимизации структуры различных материальных объектов.
3. Классификация моделей и их анализ.
4. Физические модели, область их применения. Аналоговые модели,

Области применения.

5. Математические модели, область их использования. Преимущества и недостатки.
6. Математические модели процессов в поршневых двигателях (квазистационарные: одно, двух и много зонные). Их принципиальные отличия и возможности.
7. Принцип формирования пространственных моделей: одно, двух и трёхмерных. Их возможности в исследовании процессов в поршневых двигателях. Способы решения систем уравнений.
8. Сравнение эффективности применения различных моделей при решении практических задач исследования термодинамических и газодинамических процессов в двигателях.
9. Требования к математическим моделям.
10. Расчётные схемы. Правила выбора начальных и граничных условий.
11. Методы оценки адекватности модели.
12. Блочный (модульный) принцип формирования математических моделей.
13. Методика и критерии выбора типа модели для решения конкретной задачи.

При изучении материала первого модуля студент должен твёрдо усвоить, что любая модель есть средство для проведения научных и прикладных исследований процессов или функционирования объектов..

Под моделированием понимают воспроизведение изучаемых свойств объекта или явления при функционировании модели в требуемых условиях. Модель – это образ, структура или материальное тело, которое воспроизводит с той или иной мерой сходства явление или объект. Модель *всегда* отображает объект или явление *приближённо*. Принято различать модели:

При физическом моделировании исследуемый объект или процесс по физической природе совпадет с моделью (например, одноцилиндровый отсек).

При математическом моделировании объект или процесс заменяют его описанием с помощью математических методов (формулы, системы уравнений соответствующей сложности, эмпирические зависимости и т.д.). Значительные достижения в развитии вычислительной техники обеспечили преимущественное применение этого вида моделирования.

Исследования с помощью математических моделей называют численным экспериментом.

Перенос результатов, полученных при эксперименте на модели, на реальный объект, явление подчиняется строгой закономерности в соответствии с теорией подобия.

В заключение, кроме усвоения выше приведённых вопросов, студент должен выполнить индивидуальное задание по обоснованию выбора типа математической модели для исследования процессов (тип двигателя может быть изменён):

- 1) сжатия в дизеле;
- 2) впуска в бензиновом двигателе;
- 3) в выпускном трубопроводе;
- 4) во выпускном трубопроводе;
- 5) течения газа в выпускном трубопроводе;
- 6) сгорание в газовом двигателе;
- 7) сгорание в дизеле;
- 8) впуска и сжатия в газодизеле;
- 9) выпуска в двигателе с турбонаддувом;
- 10) выпуска в двигателе с турбонаддувом.

Модуль 2. Модели процессов газообмена, сжатия, расширения и сгорания

При изучении данных тем целесообразно использовать методические указания к практическим занятиям по моделированию процессов в поршневых двигателях.

Изучаемые темы:

2.1. Исходное уравнение для моделирования процессов в цилиндре.

Моделирование теплообменных процессов.

2.2. Модели процессов сжатия и расширения при работе двигателей на различном топливе.

2.3. Математическая модель процессов газообмена в цилиндре двигателя.

2.4. Моделирование характеристик тепловыделения

2.5. Модели процесса сгорания в двигателях с зажиганием от искры.

2.6. Модели процесса сгорания в двигателях с воспламенением от сжатия.

Предварительно студенты должны обратить внимание на то, что в рамках данного курса изучаются математические модели, которые описывают процессы в системах двигателей с короткими трубопроводами ($L_{TP} \leq 6D_{TP}$), в объемах которых можно пренебречь волновыми и инерционными явлениями. Обычно это условие выполняется в поршневых двигателях с числом цилиндров не более четырех без наддува и с турбонаддувом, получивших наибольшее распространение на автомобилях и тракторах.. В них изменение показателей состояния рабочего тела в термодинамических процессах фиксируется по времени τ или углу поворота коленчатого вала, ϕ° п.к.в.

В процессе изучения тем 2-го модуля студенты должны ознакомиться с пакетом программ, разработанных на кафедре ТД и ЭУ. Это необходимо для выполнения в рамках самостоятельной работы численных экспериментов исследовательского характера.

Основные вопросы для самоконтроля:

1. Из каких процессов состоит цикл поршневого двигателя?
2. Уравнения основных термодинамических процессов.
3. Уравнение состояния и исходное уравнение для вычисления давления рабочего тела в цилиндре.
4. Назовите основные факторы, влияющие на изменение давления рабочего тела в цикле поршневого двигателя?
5. Модель процесса теплообмена между рабочим телом и стенками внутри цилиндрового пространства.
6. Исходное уравнение и модель процессов сжатия и расширения рабочего тела в цилиндре.
7. Основные перетекания рабочего тела между цилиндром и трубопроводами в процессах газообмена. Нарисуйте диаграмму газообмена в pV .
8. Исходное уравнение для моделирования процесса газообмена в цилиндре.
9. Уравнение для вычисления приращения массы рабочего тела в цилиндре в процессах выпуска и впуска.
10. Уравнение для вычисления приращения давления рабочего тела вследствие

изменения его массы в процессах газообмена.

11. Что представляют собой характеристики тепловыделения (выгорания топлива) ?
12. Эмпирическое уравнение тепловыделения И.И. Вибе.
13. Уравнение для вычисления приращения давления рабочего тела в цилиндре двигателя с зажиганием от искры.
14. Уравнение для вычисления приращения давления рабочего тела в цилиндре двигателя с воспламенением от сжатия.

При изучении материала второго модуля студент должен обратить внимание на то, что наиболее информативным параметром, по которому можно оценивать качество протекания процессов в цилиндре, является давление рабочего тела. В течение цикла величина его зависит от изменения объёма цилиндра V , изменения массы рабочего тела при газообмене M , подвода теплоты при сжигании топлива Q , теплообмена со стенками внутрицилиндрового пространства Q_w и др. факторов.

Приращения от изменения объёма рабочего тела в цилиндре и теплообмена имеют место в течение всего термодинамического цикла, приращение от изменения массы только в процессе газообмена, а от подвода теплоты в процессе сгорания топлива.

При моделировании теплообменных процессов в цилиндре двигателя приращение определяется для условия $V = const$, то есть в предположении, что при этом изменяется только внутренняя энергия рабочего тела в цилиндре $Q_w = c_v M T = \frac{c_v p V}{R}$.

Теплота, участвующая в теплообмене между рабочим телом и стенками внутрицилиндрового пространства вычисляется по формуле Ньютона-Рихмана

$$Q_w = \alpha_w F_c \Sigma (T_c - T_{vx}),$$

где α_w - коэффициент теплоотдачи;

F_c - площадь поверхностей поршня, крышки цилиндра и поверхности зеркала цилиндра в данный момент времени;

T_c - текущая температура рабочего тела;

T_{vx} - средние температуры поверхностей внутрицилиндрового пространства.

Процессы сжатия и расширения происходят при закрытых органах газораспределения. Поэтому приращение давления происходит вследствие изменения объёма цилиндра и теплообмена со стенками

Уравнение для расчёта приращения давления, вследствие изменения объёма рабочего тела в цилиндре V при постоянной массе рабочего тела в нём M и отсутствии подвода теплоты Q , выводится из уравнения политропного процесса $p V^k = const$.

Следует отметить, что значение k зависит от состава рабочего тела и термодинамического процесса, при котором происходит изменение его объёма в цилиндре. При моделировании процесса сжатия в двигателях с внутренним смесеобразованием необходимо учитывать изменение массы рабочего тела в цилиндре вследствие впрыска топлива.

Температура рабочего тела в цилиндре определяется по уравнению состояния

$$T = \frac{p V}{R M}.$$

В процессе газообмена приращение давления в цилиндре за элементарный промежуток времени при $V = \text{const}$ обусловлено перемещением масс газов с текущей температурой между цилиндром и трубопроводами. Для определения его используется уравнение баланса внутренних энергий (см. метод. указания к практическим занятиям)

$$\frac{dU}{d\tau} = \frac{dU_p}{d\tau} + \frac{dU_s}{d\tau}.$$

После соответствующих преобразования получены уравнения для расчёта приращений:

- массы при выпуске и впуске рабочего тела

$$\frac{dM}{d\varphi} = \frac{-G_{cp} + G_{pc} - G_{cs} + G_{sc} + G_{lsc} - G_{lcs}}{6n_d},$$

- давления

$$\frac{dp_m}{d\varphi} = \frac{R}{c_v 6n_d V} \left(-c_v G_{cp} T + (c_v)_p G_{pc} T_p - c_v G_{cs} T + (c_v)_s (G_{sc} + G_{lsc}) T_s - c_v G_{lcs} T \right).$$

При моделировании процесса сгорания топливовоздушной смеси в цилиндре двигателя необходимо иметь в виду, что это быстро протекающий и очень сложный процесс. Существующие модели процесса сгорания топлива пока не могут с высокой степенью достоверности описать протекающие реакции и выделяющуюся при этом энергию. Однако, при исследовании циклов во многих случаях можно использовать более простые модели процесса сгорания топлива в цилиндре. При выборе более простой модели необходимо принимать такие допущения, которые позволяли бы получить результаты, удовлетворяющие целям исследования.

Наибольшее применение получила методика И.И. Вибе, которая предполагает пошаговый расчёт показателей процесса сгорания с использованием характеристик тепловыделения. Характеристикой тепловыделения x принято называть отношение теплоты ΔQ_x , выделившейся при сгорании топлива за данный элементарный промежуток времени ($\Delta\tau$ или $\Delta\varphi$) ко всему количеству теплоты,

выделившейся при выгорании цикловой подачи топлива. Достоверные характеристики тепловыделения получают при обработке экспериментальных индикаторных диаграмм. При математическом моделировании процесса сгорания обычно используют эмпирическую закономерность выгорания топлива, которая описывается экспонентой

$$x = \frac{\Delta Q_z}{Q_z} = 1 - e^{-6,908 \left(\frac{\varphi_z}{\varphi_{cz}} \right)^{m+1}}; \quad Q_z = \frac{\xi_z (H_u - \Delta H_u) m_c}{M_1 (1 + \alpha)},$$

где $Q_z, \Delta Q_z$ - теплота, выделившаяся при сгорании топлива в цилиндре за цикл и элементарный промежуток времени (шаг расчета); φ_{cz} - продолжительность сгорания цикловой дозы топлива, гр. п.к.в.; φ_z - текущая продолжительность выгорания топлива, гр. п.к.в.; H_u - низшая теплота сгорания топлива, Дж/кг; ΔH_u - неполнота выгорания топлива при $\alpha < 1$, Дж/кг; α, ξ_z - коэффициенты избытка воздуха и использования теплоты; M_1 - цикловая масса свежего заряда, кг; m_c - цикловая масса топлива, кг; m - показатель характера сгорания.

Скорость тепловыделения, характеризующая интенсивность нарастания давления в цилиндре, определяется производной по углу п.к.в. $W_x = dx/d\varphi$.

Математическая модель процесса выгорания топлива в цилиндре базируется на использовании уравнения первого закона термодинамики и характеристик тепловыделения. По [1] ознакомиться с эмпирическими уравнениями для угла задержки воспламенения смеси.

Относительная доля теплоты, выделившейся к рассматриваемому моменту времени, (или выгоревшего топлива) вычисляются по полуэмпирическому уравнению $x = 1 - e^Y$,

где - для дизеля $Y = -6.908 \left[\left(\frac{Q_{B\varphi}}{Q_z} \right)^{m_B} + \left(\frac{Q_{D\varphi}}{Q_z} \right)^{m_D} \right]$;

- для двигателя с воспламенением от искры $Y = -6.908 \left(\frac{Q_\varphi}{Q_z} \right)^{m_B}$;

$Q_{B\varphi}, Q_{D\varphi}$ - текущие количества теплоты, выделившееся к рассматриваемому промежутку времени при объёмном и диффузионном сгорании ($Q_B + Q_D = Q_z$); m_B, m_D - соответствующие показатели характера сгорания;

Модуль 3. Моделирование процессов в трубопроводах и газотурбинного наддува

Изучаемые темы:

- 3.1. Модели процессов в выпускном и впускном трубопроводах.
- 3.2. Моделирование газотурбинного наддува.
- 3.3. Аппроксимация характеристик компрессора полиномами.
- 3.4. Использование характеристик компрессора для расчёта текущего расхода воздуха при турбонаддуве одно и двух цилиндровых двигателей.
- 3.5. Особенности моделирования процессов в газодизеле.

Основные вопросы для самоконтроля:

1. При каком условии термодинамические уравнения можно использовать для моделирования процессов в выпускном и впускном трубопроводах?
2. Какое термодинамическое уравнение предпочтительно использовать для моделирования процессов в выпускном и впускном трубопроводах?
3. Разработать модель для определения параметров рабочего тела в выпускном трубопроводе.
4. Разработать модель для определения параметров рабочего тела во впускном трубопроводе.
5. Какие предпосылки и допущения принимаются при моделировании газотурбинного наддува (турбонаддува)?
6. В каком случае текущий расход воздуха через компрессор определяется с использованием характеристики компрессора?
7. Как при расчёте двигателя с турбонаддувом определить наличие помпажа?
8. Методика аппроксимации характеристики компрессора полиномами.
9. Методика настройки расчёта цикла на конкретный двигатель.
10. Порядок расчёта фаз газораспределения.

При квазистационарном методе для моделирования процессов в выпускном и впускном трубопроводах используются уравнения баланса энталпий (энергий)

$$\frac{dI_p}{d\tau} = \sum_{j=1}^i \left(\frac{dI_{cp}}{d\tau} - \frac{dI_{pc}}{d\tau} \right) - \frac{dI_{po}}{d\tau} + \frac{dE_p}{d\tau}, \text{ где } I_p, I_{cp}, I_{pc}, I_{po} - \text{энталпии газов в трубопроводе,}$$

выходящих из цилиндра, возвращающихся в цилиндр (если $p_p > p_c$), выходящих из

трубопровода в атмосферу или турбину; E_p - кинетическая энергия газа, движущегося в трубопроводе; i, j - количество и номер цилиндров, подсоединённых к трубопроводу.

$$\text{После преобразований } \frac{dp_p}{d\varphi} = \frac{R}{6n_d V_p} \left(\sum_{j=1}^i \left[\frac{c_p}{(c_p)_p} G_{cp} T \right] - \sum_{j=1}^i (G_{pc} T_p) - G_{po} T_p + \frac{E_p}{(c_p)_p} \right),$$

где $(c_p)_p, V_p$ - изобарная теплоёмкость газов и объём выпускного трубопровода.

$$\text{Температура газов } \frac{dT_p}{d\varphi} = \frac{T_p R}{p_p (c_p)_p} \frac{dp_p}{d\varphi}.$$

Аналогичная методика принимается для модели приращения давления и температуры во впускном трубопроводе.

При моделировании циклов в поршневых двигателях агрегат наддува в большинстве случаев представляют в виде «чёрного ящика», используя только входные и выходные параметры: расходы, давления, КПД, частота вращения ротора. Наиболее простой вид имеет модель турбонаддува с постоянным давлением газа перед турбиной, количеством цилиндров более 6 в ряду и большим объёмом впускного трубопровода. Модель существенно усложняется для двигателей с большими амплитудами колебаний давления воздуха во впускной системе. В этом случае наиболее сложным является определение текущих переменных параметров наддувочного воздуха, в частности, его расхода G_k через компрессор.

Для решения этой задачи предложена новая математическая модель турбонаддува, позволяющая установить взаимную связь граничных условий на входе и выходе из турбокомпрессора. Ротор турбокомпрессора, обладающий большим запасом кинетической энергии E_{TK} от выпускных газов с располагаемой энергией E_p , получает через турбину добавочную энергию E_T и через компрессор в количестве E_K передает ее свежему заряду с энергией E_S . Для бесконечно малого промежутка времени этот процесс описывается

$$\text{уравнением } \frac{dE_{TK}}{d\tau} = \frac{d(E_T - E_K)}{d\tau}.$$

В программе предусмотрено определение среднего интегрального за цикл расхода воздуха G_{kcp} и сравнение его со значением на расчетном режиме. В случае расхождения (больше заданного), выполняется подстройка программы.

Настройка расчета цикла – это процесс согласования конечных параметров (показателей), полученных по результатам расчета, с заданными (или экспериментальными) данными на исходном режиме работы двигателя. Согласование

может выполняться по мощности, коэффициенту избытка воздуха и другим показателям цикла (см. инструкцию к пакету программ).

Список рекомендуемой литературы

Основная литература.

1. Кавтарадзе Р.З. Теория поршневых двигателей. Специальные главы. Учебник для вузов.-М.: ИРзд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана,2008.-720с. (ISBN 978-5-7038-3086-4)
2. Двигатели внутреннего сгорания. Кн.1. Теория рабочих процессов: Учебник для вузов/ В.Н. Луканин, К.А. Морозов, А.С. Хачиян и др.; Под ред. В.Н. Луканина.-М.: Высш.шк., 2005.-479 с.
3. Двигатели внутреннего сгорания: Кн.3. Компьютерный практикум. Моделирование процессов в ДВС: Учебник для вузов / В.Н. Луканин, М.Г. Шатров, Г.Ю. Кричевская и др.; Под ред. В.Н. Луканина и М.Г. Шатрова.- М.: Высш. шк., 2005.-414 с.
4. Гаврилов А.А., Игнатов М.С., Эфрос В.В. Расчет поршневых двигателей внутреннего сгорания. – Владимир, 2003. – 102 с.
5. Круглов М.Г., Меднов А.А. Газовая динамика комбинированных двигателей внутреннего сгорания: Учеб. пособие для вузов.- М.: Машиностроение, 1988.-360 с.

Дополнительная литература

6. Двигатели внутреннего сгорания. Теория поршневых и комбинированных двигателей / Под ред. А.С.Орлина и М.Г.Круглова. - М.: Машиностроение, 1983.- 375 с.
7. Вибе И.И. Новое о рабочем цикле двигателя внутреннего сгорания.- М.: Машиностроение, 1961. - 240 с.
8. Разлейцев Н.Ф. Моделирование и оптимизация процесса сгорания в дизелях. – Харьков: Вища школа, 1980. – 168 с.
9. Гаврилов А.А. Проектирование турбокомпрессоров для наддува поршневых двигателей внутреннего сгорания: учеб. пособие / А.А. Гаврилов, М.С. Игнатов; Владим. гос. ун – т. –Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2009