

Моделирование рабочих процессов в ДВС

В 1907 году В.И. Гриневецкий опубликовал небольшой, но капитальный по своему содержанию и значению труд «Тепловой расчет рабочего процесса двигателей внутреннего сгорания», в котором изложил термодинамическую математическую модель рабочего процесса в цилиндре ДВС. В этой модели на основе законов сохранения энергии, массы и состояния В.И. Гриневецкий путем последовательного рассмотрения процессов сжатия, сгорания и расширения дал метод расчета интегральных показателей двигателя и определения его основных размеров. В дальнейшем эта модель была усовершенствована его учеником Е.К. Мазингом и под названием модели Гриневецкого-Мазинга около ста лет успешно использовалась при конструировании двигателей внутреннего сгорания.

В 1923 году профессор Н.Р. Брилинг предложил метод расчета выпуска и продувки стационарных и судовых двигателей. Дальнейшее развитие этого расчета нашло в работах Г.Г. Калиша, С.А. Алексеева и А.С. Орлина.

В 1934-1936 гг. профессор А.С. Орлин разработал теорию процессов газообмена двухтактных двигателей, основанную на уравнениях неустановившегося движения. На основе этой теории А.С. Орлин предложил метод конструирования продувочных окон двухтактных двигателей.

Б.Г. Либрович разработал оригинальные методы расчета разделенных камер сгорания.

Появление вычислительной техники открыло новые возможности в развитии методов моделирования рабочего процесса ДВС в направлении более детального описания термогазодинамических и химических процессов, протекающих в цилиндрах и газораспределительных трактах.

В 1970 году Н.А. Иващенко разработал однозонную квазистационарную термодинамическую математическую модель замкнутого цикла рабочего процесса в цилиндре четырехтактного дизеля со свободным турбокомпрессором, в которой процессы сжатия и сгорания – расширения рассчитывались по методике Гриневецкого-Мазинга, а расчет процессов газообмена выполнялся пошаговым методом по уравнениям баланса массы и энергии. Давление газа перед турбиной находилось из уравнения баланса мощностей турбины и компрессора, а температура газа перед турбиной определялась из уравнения внутреннего теплового баланса. При расчетах нестационарные явления во впускном и выпускном трубопроводах не учитывались, т.е., давление газа во впускном и выпускном трубопроводах принималось постоянным. Относительные потери теплоты в цилиндре двигателя и выпускной системе и среднее давление механических потерь рассчитывались по обобщенным экспериментальным данным. Входными параметрами модели являлись частота вращения вала, цикловая подача топлива, степень сжатия, температура и давление воздуха после компрессора, коэффициенты полезного действия турбины и компрессора, регулировочные и конструктивные параметры дизеля, параметры охладителя воздуха.

В 1971-73 годах эта модель была существенно уточнена Г.Н. Мизернюком и В.С. Козловым в направлении более детального учета особенностей работы агрегатов наддува при анализе работы комбинированных двигателей со сложными схемами. В усовершенствованной модели характеристики турбин и компрессоров либо рассчитывались, либо задавались в виде обобщенных экспериментальных зависимостей. В процессе моделирования находились точки совместной работы дизеля и агрегатов наддува в соответствии с особенностями анализируемой схемы комбинированного двигателя. С помощью этой модели выполнен анализ схем комбинированных двигателей типа ЧН 26/26 со свободным турбокомпрессором, с силовой турбиной и с двухступенчатым наддувом, а также двигателей с регулируемым агрегатами наддува.

В то же время М.Г. Круглов и А.А. Меднов разработали однозонную термодинамическую математическую модель комбинированного двухтактного двигателя и выполнили

обширные исследования по анализу рабочего процесса форсированных двухтактных комбинированных двигателей.

Дальнейшее развитие методов моделирования рабочих процессов двигателей на кафедре выполнялось в направлении совершенствования расчета процессов сгорания-расширения, а также в направлении моделирования течений в газоздушном тракте многоцилиндровых двигателей.

В 1980 г. Н.А. Иващенко разработал однозонную дифференциальную термодинамическую модель комбинированных двухтактных и четырехтактных двигателей с внутренним и внешним смесеобразованием. Процессы в цилиндре описывались системой дифференциальных уравнений для открытой термодинамической системы. Тепловыделение в цилиндре описывалось двухмаксимумными функциями или таблично заданными экспериментальными зависимостями. Теплообмен между рабочим телом описывался уравнением Ньютона-Рихмана отдельно для тепловоспринимающих поверхностей поршня, гильзы и головки цилиндра с оценкой коэффициентов теплоотдачи по зависимостям Вошни, Эйхельберга, Гогенберга. Математическая модель реализована в виде программного комплекса «НКИ», который широко использовался и используется при выполнении НИР, а также студентами при выполнении домашних заданий, курсовых и дипломных проектов.

На базе этой математической модели Н.А. Иващенко и Н.В. Петрухиным в 1984-1985 гг. создана сопряженная математическая модель рабочего процесса двигателя с разделенными и неразделенными камерами и теплопроводности деталей, образующих камеру сгорания. В этой модели совместное моделирование рабочего процесса и теплового состояния деталей реализуется в виде итерационного моделирования рабочего процесса и температурных полей деталей, образующих камеру сгорания. Моделирование температурных полей деталей реализуется методом конечных элементов в двумерной постановке. При моделировании рабочего процесса для оценки теплоотдачи используются распределения локальных температур поверхностей поршня, головки цилиндра и гильзы цилиндра с учетом движения поршня, а при моделировании температурных полей деталей используются коэффициенты теплоотдачи, вычисленные при моделировании рабочего процесса в цилиндре двигателя. Итерационный процесс сходится через 4-5 итераций и в результате параметры рабочего процесса и температурные поля деталей камеры сгорания оказываются согласованными. В модели теплопроводности предусмотрено моделирование стационарного распределения температуры, а также моделирование цикловых колебаний температуры на тепловоспринимающих поверхностях деталей камеры сгорания. Исследователи получили возможность анализировать не только влияние параметров рабочего процесса на характеристики двигателя и локальные температуры деталей, но и конструкции деталей камеры сгорания и их материалов, а также параметров теплообмена на поверхностях их охлаждения на температуры деталей и характеристики двигателя.

В 1992 году Е.Е. Систейкина дополнила модель Петрухина-Иващенко описанием процессов в теплообменных аппаратах системы охлаждения двигателя.

Значительный вклад в развитие методов моделирования процессов в ДВС внес коллектив, руководимый В.И. Ивиным. Под его руководством Н.А. Лапушкин разработал однозонную термодинамическую модель рабочего процесса в быстроходных форсированных двигателях с уменьшенным отводом теплоты от рабочего тела, утилизацией теплоты в силовой турбине, с разнообразными схемами воздухообмена с дополнительными камерами сгорания, перепуском воздуха и рециркуляцией остаточных газов при работе на различных топливах. При моделировании использовались экспериментально определенные характеристики турбины и компрессора.

Все рассмотренные математические модели рабочего процесса обладали общим недостатком – упрощенным описанием процесса тепловыделения в цилиндре двигателя по зависимостям типа И.И. Вибе и их разновидностям. Параметры показателей сгорания, продолжительности сгорания являются ненаблюдаемыми и зависят от параметров топли-

воподачи, закона впрыскивания топлива, формы камеры сгорания, характера движения заряда в камере сгорания, физических свойств топлива и множества других регулировочных факторов. Поэтому достоверность результатов моделирования зависит от надежности оценки параметров характеристик тепловыделения, выполняемой методами идентификации или привлечением экспериментально полученных данных. Потребовалось дальнейшее развитие методов моделирования процессов в цилиндре.

Работу по созданию новой математической модели процессов в комбинированном двигателе начал в 1984 году А.А. Кулешов под руководством Г.Н. Мизернюка. Особенностью предложенной ими интегральной модели является пошаговое определение параметров газа в открытой термодинамической системе путем решения системы интегральных уравнений сохранения энергии и массы на каждом шаге по времени, которая сводится к системе нелинейных алгебраических уравнений. Созданный ими алгоритм превосходит по быстродействию в 5-30 раз алгоритмы численного интегрирования системы дифференциальных уравнений, описывающих состояние открытой термодинамической системы методами Рунге-Кутты или Эйлера, так как позволяет вести расчет со значительными более крупными шагами по времени. Второй особенностью предложенной математической модели является расчет характеристик тепловыделения по методу Н.Ф. Разлейцева, позволяющему учесть процессы топливоподачи и смесеобразования. Согласно методу Н.Ф. Разлейцева, творчески развитым А.С. Кулешовым, в камере сгорания заданной формы

рассматривается развитие струй топлива, взаимодействие их с движущимся зарядом цилиндра, со стенками камеры сгорания, развитие пристеночных потоков топлива и взаимодействие их между собой. Газообмен в предложенной модели рассчитывается с учетом нестационарного течения газов в канале по методике А.С. Орлина в квазистационарной постановке. Характеристики агрегатов наддува в предложенной модели рассчитываются, либо задаются по экспериментальным данным. Повышенное быстродействие и наличие большого количества в модели управлений позволило решать с ее помощью многокритериальные оптимизационные задачи по выбору параметров рабочего процесса, регулировочных параметров, параметров топливной аппаратуры (давление и продолжительность впрыскивания, фазы впрыскивания, число сопловых отверстий распылителя и их размеры), форму камеры сгорания, интенсивность вихря, подбирать агрегаты наддува и их регулировки.

Модель реализована в компьютерных кодах «Дизель 2/4т» и «Дизель – РК». В создании программных комплексов кроме А.С. Кулешова активное участие принимали Башмаков В.И., Каримов А.Н., Волков К.И., Ю.А. Фадеев.

Программный комплекс ДИЗЕЛЬ-2/4т позволяет:

- производить математическое моделирование рабочих процессов двигателей внутреннего сгорания, как дизельных, так и бензиновых и газовых с искровым зажиганием и форкамерой, используя при этом различные модели сгорания - от простейшей модели И.И.Вибе, до современных, построенных на расчете трехмерного движения топливных струй в завихренном заряде камеры сгорания дизеля;
- осуществлять расчет различных режимов работы, включая скоростную, нагрузочную, высотную и другие характеристики двух- и четырехтактных ДВС, с различными схемами подключения коллекторов, преобразователей импульсов, турбин, компрессоров и охладителей наддувочного воздуха; учет агрегатов наддува осуществляется разными способами, включая согласование их характеристик (возможен оптимальный подбор проточных частей турбин и компрессоров к поршневному ДВС);
- рассчитывать поля универсальных характеристик турбин и компрессоров по размерам их проточных частей (при доукомплектовании системы специальными программами газодинамического расчета турбин и компрессоров, не входящими в комплект базовой поставки);

- прогнозировать мощностные, экономические и экологические показатели двигателя при проведении различных конструктивных мероприятий, связанных с модернизацией топливной аппаратуры, формы камеры сгорания, организацией закрутки заряда, выбором фаз газораспределения и системы наддува;
- решать многофакторные задачи оптимизации рабочего процесса, используя для этого как метод сканирования (для двумерных задач), так и методы нелинейного программирования (для n-мерных задач), библиотека программы содержит 14 методов оптимального поиска.
- исследовать рабочий процесс КДВС с нетрадиционным преобразующим механизмом (закон движения поршня может быть произвольным).

Программный комплекс ДИЗЕЛЬ - РК

Дальнейшим развитием комплекса ДИЗЕЛЬ-2/4т является ДИЗЕЛЬ-РК. Программный комплекс предназначен для расчета и оптимизации рабочих процессов дизелей, бензиновых и газовых двигателей, включая газовые предкамерные ДВС, 2- тактные и 4- тактные. Ядро программ написано на ФОРТРАНЕ. Интерфейсная оболочка - на С++.

Основные свойства:

- WINDOWS приложение;
- развитый пользовательский интерфейс, включающий дополнительные средства для упрощения задания исходных данных начинающими пользователями, что делает возможным оперативный анализ концепции ДВС;
- возможность импорта SAE файлов с характеристиками турбин и компрессоров, экспорт и импорт графических функций;
- возможность работы с удаленными пользователями через ИНТЕРНЕТ;
- высокое быстродействие;
- возможность эффективного решения оптимизационных задач, используя процедуры нелинейного программирования;
- комбинированный расчет газообмена (нестационарность течения рассматривается только в клапанных каналах ДВС);
- для расчета тепловыделения используются:
 - а) метод Вибе для искровых ДВС,
 - б) РК-модель для дизелей.

Программа ДИЗЕЛЬ-РК позволяет наиболее эффективно решать задачи оптимальной организации рабочего процесса ДВС, в том числе:

- выбор фаз газораспределения одинаковых для всех цилиндров,
- подбор агрегатов наддува, имея характеристики турбин и компрессоров,
- проектирования камеры сгорания и ТПА,
- оптимизация степени сжатия, параметров топливоподачи для минимизации расхода топлива и эмиссии вредных веществ,
- сравнение разных концепций двигателей.

Программа ДИЗЕЛЬ-РК имеет в своем составе специальный код «Fuel Spray Visualization», который позволяет просматривать в виде фильма результаты расчета движения струй топлива в камере сгорания, взаимодействие струй с вихрем, со стенками камеры сгорания и между собой, распределение топлива по характерным зонам, попадание его на разные поверхности. Эти особенности открывают широкие возможности для исследователя оптимальным образом проектировать камеру сгорания в поршне, выбирать направления сопловых отверстий распылителя в зависимости от характеристики впрыска и других условий. На рис. 3. представлены изображения процесса смесеобразования в цилиндрах разных двигателей: с центрально расположенной форсункой; с двумя форсунками, расположенными на периферии цилиндра; со смещенной форсункой. В двух последних случаях в программе индивидуально рассчитывается развитие каждой струи. Программа поддерживает расчет многофазового впрыска.

С меньшей надежностью эта программа позволяет исследовать особенности газообмена в ДВС с разветвленными трубопроводами.

Для моделирования динамического наддува, исследования особенностей течения в элементах газоздушного тракта ДВС и исследования неравномерности наполнения и очистки цилиндров на кафедре разработаны модели, использующие численные методы механики жидкости и газа.

Математические модели процессов рабочего цикла и нестационарных процессов в газоздушном тракте

В математической модели рабочих процессов двухтактного дизеля [1, 2] моделирование процессов в цилиндре выполнено методами технической (квазиравновесной) термодинамики; процессов в выпускном трубопроводе – системой уравнений одномерного нестационарного потока совершенного газа. Модель процессов газообмена в цилиндре построена в виде трехзонной термодинамической системы: зона чистого воздуха, зона смешения и зона чистых продуктов сгорания. Закономерность перемешивания газов выражена эмпирическим уравнением.

Математическая модель, в которой уравнения всех процессов в цилиндре и процессов в трубопроводах базируются на термодинамическом методе, изложена в учебнике [3] и в [6, 7, 11]. Ее особенность в том, что дифференциал полной внутренней энергии, как полный дифференциал функции состояния, выражен в частных производных функции трех переменных – массы рабочей газовой смеси, состава смеси и температуры.

В математических моделях четырехтактного дизеля [4, 7, 9, 12], также как в [1, 2] применяется термодинамический метод для процессов в цилиндре и метод нестационарной газовой динамики для процессов в трубопроводах в одномерной постановке. Алгоритмы реализации моделей различаются методами численного решения основных уравнений и уравнений граничных условий. Модель одномерного нестационарного течения в выпускном трубопроводе [7] дополнена уравнениями смешения потоков газа в квазистационарном представлении [8, 9].

Вариант модели для одномерного нестационарного течения газов в разветвленном впускном трубопроводе изложен в [10]. Здесь использованы эмпирические коэффициенты потери энергии в тройнике, которые определены методом физического моделирования.

Литература

1. Круглов М.Г., Меднов А.А. Математическое моделирование на ЭВМ, как метод исследования комбинированных двигателей внутреннего сгорания // Научные труды УСХА, вып. 186. -1976.
2. Круглов М.Г., Меднов А.А. Математическая модель комбинированного двигателя внутреннего сгорания //Сб. Рабочие процессы в ДВС. МАДИ, 1978.
3. Двигатели внутреннего сгорания: Теория поршневых и комбинированных двигателей: Учебник для вузов по специальности “Двигатели внутреннего сгорания” / Д.Н.Вырубов, Н.А.Иващенко, В.И.Ивин и др.; Под ред. А.С.Орлина, М.Г.Круглова. - 4-е изд. - М.: Машиностроение, 1983.-372 с.
4. Ивин В.И., Вознесенский А.Н. Алгоритм математической модели процессов в комбинированных ДВС // Тез. док. Вс. конф. - М.: МВТУ. - 1980. - С. 35
5. Апциаури А.З., Ивин В.И. Математическая модель процессов в цилиндре ДВС // Изв. вузов. Машиностр. – 1981 -№9. – С. 159-160
6. Ивин В.И., Лапушкин Н.А. Математич. моделирование процессов в ДВС // Изв. вузов. Машиностр. -1987. - № 5. - С. 44-49
7. Лашко В.А. Математическая модель нестационарного течения.
// Изв. вузов. Машиностроение. – 1978.- № 1. – С. 72-76
8. Ивин В.И., Лашко В.А. Расчет отрывного течения в преобразователе импульсов комбинированного ДВС. // Известия вузов. Машиностроение. – 1979. -№12. - С.66 –70
9. Лашко В.А., Ивин В.И. К вопросу о расчете отрывных течений в каналах // Вопросы

совершенствования работы дизелей на неустановившихся режимах и при высокой форсировке: Сб. научн. тр. - Хабаровск. 1978.

10. Рындин В.В. Математическое моделирование процесса наполнения двигателя с разветвленным впускным трубопроводом. // Известия вузов. Машиностроение. – 1980. - №2. – С. 71-75

11. Ивин В.И., Лапушкин Н.А. Математическое моделирование процессов комбинированного двигателя с частичной тепловой изоляцией // Известия вузов. Машиностроение. – 1987.-№ 5. - С. 44-49

12. Ивин В.И., Марков А.А. Повышение эффективности системы наддува двигателя // Диагностика, повышение эффективности, экономичности и долговечности дизелей: Тезисы докладов всесоюзного научно-технического семинара. г. Ленинград-Пушкин, 1990.