

Калинина М. И. Шабанов А.Ю

Автоматизация проектирования и испытаний ДВС

Курс лекций

Содержание

| | |
|---|----|
| 1. Сложные технические системы и этапы их проектирования..... | 2 |
| 1.1 ДВС как сложная техническая система (СТС) | 2 |
| 1.2 Этапы проектирования СТС | 5 |
| 2. Состав и классификация САПР СТС | 7 |
| 3. Математическое моделирование..... | 9 |
| 3.1 Типы математических моделей..... | 9 |
| 3.1.1 Критерии оценки математической модели | 11 |
| 3.2 Упрощенная математическая модель четырехтактного двигателя с наддувом и алгоритм расчета нагрузочной характеристики | 12 |
| 3.3 Метод экспертных оценок | 13 |
| 4. Структура расчетного блока САПР ДВС. Проблемно-ориентированные блоки..... | 14 |
| 4.1 Блок расчета рабочего процесса. | 17 |
| 4.3 Блок расчета топливоподающей аппаратуры. | 20 |
| 4.3 Блок расчета газодинамики в цилиндре. | 20 |
| 4.4 Блок расчета теплонапряженности. | 21 |
| 4.5 Блок расчета прочности деталей движения. | 22 |
| 4.6 Блок расчета трибологии и выгорания смазки. | 22 |
| 5. Автоматизация испытаний ДВС | 26 |
| 5.1 Структура и основные типы измерительно-вычислительных комплексов | 26 |
| 5.1.2 Погрешность аналого-цифрового преобразователя..... | 28 |
| 5.2 Основные характеристики ИВК «Дизель»..... | 29 |
| 5.3 Программа автоматизированных испытаний | 30 |
| Приложение 1..... | 31 |
| 3.2.1 Схема и порядок расчетов характеристик турбопоршневого двигателя | 31 |
| 3.2.2 Исходные данные для расчета..... | 31 |
| 3.2.3 Расчет номинального режима..... | 32 |
| 3.2.4 Расчет нагрузочной характеристики двигателя..... | 34 |
| Список литературы..... | 40 |

1.Сложные технические системы и этапы их проектирования

1.1 ДВС как сложная техническая система (СТС)

Современное состояние мирового двигателестроения характеризуется достижением высоких показателей в области топливной экономичности и совершенства компоновочных схем двигателей различного назначения.

В табл.1 приведены основные показатели четырех двигателей внутреннего сгорания различного назначения.

Табл.1

| Показатель | Марка двигателя | | | |
|----------------------------------|---|---|---|---|
| | 14K108ME-C | 8S80ME-C | ЮМО-207С | АИ-14РА |
| Тип двигателя | Малооборотный, двухтактный, рядный дизель с свободным ГТН | Малооборотный, двухтактный, рядный дизель с свободным ГТН | Двухтактный дизель с ПДП и комбинированной системой наддува | 4-х тактный, карбюраторный, однорядная 9-ти цилиндровая звезда с планетарным редуктором |
| Агрегатная мощность, кВт | 97300 | 19840 | 735- взлетный/ 551 - номинальный | 191- взлетный/ 162- номинальный |
| Назначение | судовой | судовой | авиационный | авиационный |
| Частота вращения, об/мин | 94 | 76 | 3000 | 2350 |
| Размерность, мм | 1080/2660 | 800/3200 | 105/160 | |
| Удельный расход топлива, г/кВт.ч | 171 | 155 | 250/231 | 340/299 |
| Сухая масса, кг | 2828000 | 1023000 | 780 | 200 |
| Удельная масса, кг/ кВт | 29,1 | 51.6 | 1,06/1,42 | 1,05/1,23 |
| Ресурс до кап. ремонта, час | Более 100000, кап. ремонту не подлежит | Более 100000, кап. ремонту не подлежит | | 1000 |

Наибольшие успехи в области топливной экономичности достигнуты в судовых малооборотных двухтактных двигателях со свободным газотурбинным наддувом. На двигателе S80ME-C лидера мирового дизелестроения компании MAN-B&W Diesel заявлен удельный расход топлива 155г/кВт.ч, но при этом материалоемкость очень велика. Наибольшая агрегатная мощность 97300 кВт достигнута на двигателе 14 K108ME, что соответствует упрощению конструкции установки до минимума. Но уже нет возможности получить удельный расход топлива менее 171г/ кВт.ч. В авиационных двигателях (дизель ЮМО-207С фирмы Юнкерс, карбюраторный звездообразный бензиновый двигатель АИ-14РА) достигнута наименьшая удельная масса около. 1 кг/кВт, но нет возможности обеспечить высокую топливную экономичность и высокие показатели по ресурсу. Таким образом, при проектировании двигателя не удастся совместить все наилучшие показатели

в одной машине. При проектировании необходимо заранее выяснить цель этой работы и постараться оптимизировать все характеристики применительно к этой цели.

В технике существует понятие сложной технической системы (СТС). Основными отличительными признаками СТС являются:

- неоднородность
- отсутствие замкнутости (взаимодействие с внешней средой)
- наличие сложных взаимодействий между элементами
- наличие регулирования по нескольким направлениям
- наличие тенденции изменения характеристик во времени.

По этим признакам такой сложный объект как разветвленная сеть подачи электроэнергии к потребителям в крупном городе не может классифицироваться как СТС, поскольку в ней происходят однородные электромагнитные процессы.

ДВС по перечисленным признакам попадает под понятие СТС.

Неоднородность

В стационарном режиме работы в ДВС происходит:

- дозирование, подача и сжигание топлива,
- преобразование возвратно-поступательного движения во вращательное
- всасывание, сжатие и подача воздуха в цилиндры, выпуск газов
- теплообмен между камерой сгорания и деталями двигателя
- теплообмен между деталями двигателя и охлаждающей средой
- преобразование энергии выпускных газов в работу в турбокомпрессоре

Взаимодействие с окружающей средой (рис.1)

Параметры двигателя зависят от температуры, атмосферного давления и влажности. При водяном охлаждении температура охлаждающей воды внешнего контура влияет на характеристики теплообменных аппаратов. Ограничения по вредным выбросам (состав выпускных газов, виброшумовые характеристики) влияют на принятие конструктивных решений. С целью объективной оценки характеристик двигателей их параметры рассчитываются для стандартных условий, окружающей среды, регламентируемых ИСО.

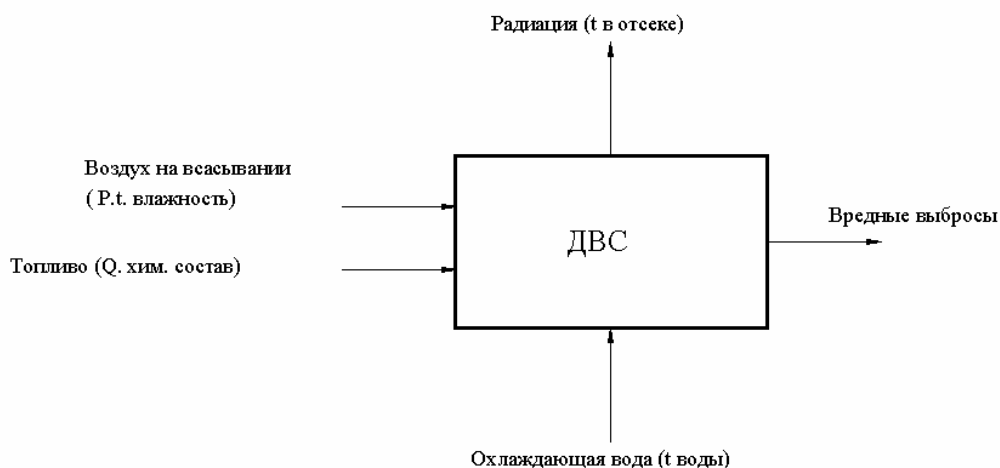


Рис.1 Схема взаимодействия ДВС с окружающей средой

Наличие сложных взаимосвязей между элементами.

В одном агрегате размещены и взаимодействуют следующие конструктивные группы:

- кривошипно-шатунный механизм

- остов
- система наддува и выпуска
- топливоподающая система
- система охлаждения
- система смазки
- система регулирования
- система пуска, реверса и управления

Наличие регулирования по нескольким направлениям.

В современном дизеле регулятор скорости поддерживает заданную частоту вращения. Регуляторы температуры поддерживают заданную температуру охлаждающей воды, масла и воздуха и могут изменять ее по программе.

Наличие тенденции изменения характеристик во времени.

В процессе эксплуатации на двигателе возникают износы, происходит нагарообразование на деталях, закоксовывание форсунок, занос деталей турбокомпрессора сажей, старение масла, что приводит к ухудшению характеристик.

Таким образом, автоматизация проектирования такого сложного объекта, как ДВС, представляет значительные трудности.

Система проектирования (САПР) представляет собой набор программных средств, позволяющих выполнить проектную документацию с помощью ЭВМ. Проектная документация включает в себя набор чертежей, спецификацию оборудования, результаты расчетов и пояснительную записку. Полностью автоматизировать процесс проектирования до настоящего времени не удалось.

Первым элементом САПР являлись вычислительные программы, позволявшие автоматизировать процесс выполнения расчетов. Затем появились графические пакеты, позволяющие создавать, хранить, передавать чертежи в электронном виде и выводить их на бумагу с помощью периферийных устройств компьютера (плоттер, принтер). Наиболее распространенным графическим пакетом общего назначения является Autocad фирмы Autodesk. Разработка приложений к графическим пакетам дала возможность в значительной степени автоматизировать выпуск чертежей для простых объектов. В первую очередь САПР были внедрены в электронной промышленности для разработки печатных плат. Затем в авиастроении и судостроении были созданы САПР для разработки поверхностей планера самолета и корпуса судна. Эти задачи относятся к плоским или разворачивающимся на плоскость. В последние годы появились пакеты, в значительной степени автоматизирующие трудоемкий процесс прокладки трубопроводов инженерных систем в объеме. Для простых проектных работ в строительстве уже созданы пакеты, объединяющие функции выполнения графической части проекта, выполнения расчетов и создания спецификации оборудования. Примером такого пакета является MagiCAD – система, предназначенная для черчения, проектирования и расчетов систем инженерного обеспечения (отопления, водоснабжения, вентиляции и канализации). Для расчетов тепловых потерь в помещениях и зданиях в целом разработана программа MagiCAD Room. Расчет выполняется для трехмерного макета помещения при задании теплопроводности материалов.

Целесообразная степень автоматизации проектирования сложных объектов в первую очередь определяется экономической эффективностью. В отсутствие массового выполнения проектов нет возможности окупить разработку полномасштабной САПР для СТС.

При построении САПР в первую очередь необходимо разработать алгоритм проектирования. Алгоритм – свод правил и последовательность действий, приводящих к выполнению задачи.

Можно выделить два основных метода проектирования сложных объектов – нисходящее и восходящее проектирование. Метод нисходящего проектирования характеризуется последовательным движением от проработки более общих элементов к конкретной проработке их составных частей, т.е. разработка системы ведется сверху вниз.

Достоинством метода является то, что даже при нечетко сформулированных требованиях к характеристикам всей конструкции по мере продвижения от элемента к элементу возможно последовательное их уточнение и развитие. Недостатком метода является необходимость создания на первоначальном этапе запаса по массогабаритным показателям, поскольку уже на начальном этапе проектирования показатели конструкции как правило, должны согласовываться с заказчиком.

Метод восходящего проектирования предполагает совершенствование конструкции в направлении от частного к общему, т.е. когда из элементов конструкции собирается вся система. В чистом виде этот метод подходит для модернизации ДВС.

При создании нового ДВС применяется нисходящий метод проектирования с постоянным уточнением конструкции в целом по мере углубления разработки отдельных узлов и деталей.

Основной проблемой при создании САПР ДВС, ориентированной на нисходящий метод проектирования, является возврат на предыдущий уровень проработки конструкции в целом с целью сопряжения всех деталей после уточнения конструкции отдельного узла. При этом САПР должна выявить все пересечения конструкций и исправить их без нарушения основных пропорций деталей. Теоретически это возможно, но затраты на разработку подобной САПР очевидно превзойдут экономию средств на проектирование ДВС после ее внедрения. Вместе с тем, применение САПР для первоначальной оценки характеристик двигателя и для разработки отдельных деталей и узлов является необходимой задачей.

1.2 Этапы проектирования СТС

В условиях глобализации мировой экономической системы нет возможности создавать СТС без анализа существующих образцов подобного класса. Если по каким либо причинам существующие образцы не удовлетворяют заказчика, выдается техническое задание на разработку СТС. При этом указывается основная причина, вызвавшая потребность в новой разработке. Например, как следует из опыта эксплуатации импортного оборудования, закупленного РАО ЕС, заявленные характеристики по его работоспособности в условиях низких температур не подтвердились.

Дизели, являющиеся СТС высокого уровня развития, не представляют интереса для разработки без определенного заказа. При создании транспортного или судового ДВС определяющее значение может иметь размещение двигателя заданной мощности в определенных заранее габаритах отсека. При массовой постройке имеет смысл наладить собственное производство, если государственная политика направлена развитие наукоемких отраслей экономики.

Основным документом для начала проектных работ является техническое задание. Составление ТЗ на разработку СТС требует достаточно высокой квалификации в данной области, и чаще всего ТЗ разрабатывается самим проектантом СТС и согласуется с заказчиком. В современных условиях изменение ТЗ по вине проектанта СТС не допускается и приводит к штрафным санкциям, поэтому практиковавшийся ранее метод последовательного уточнения и корректировки ТЗ не может предлагаться без утверждения этого пункта заказчиком.

При составлении ТЗ необходимо:

- изучить существующие аналоги
- проверить выполнимость поставленной заказчиком задачи
- просмотреть возможности производственной базы отрасли
- просмотреть нормативные документы, регламентирующие характеристики данной СТС (ГОСТ, ОСТ, международные стандарты)

Любая новая разработка должна соответствовать всем требованиям принятым в отрасли заказчика нормативных документов. Например, судовой дизель должен соответствовать Морскому Регистру.

В ТЗ на разработку ДВС необходимо оговорить:

- Мощность и частота вращения, поскольку два этих параметра уже определяют класс двигателя.
- Ограничения по массе и габаритам двигателя, определяемые условиями его установки.
- Экономичность по топливу и маслу.
- Ресурс, срок службы до первой переборки.
- Токсические характеристики отработавших газов.
- Акустические характеристики двигателя.
- Условия окружающей среды (температура, влажность воздуха, высота над уровнем моря, наличие охлаждающей воды и ее температура, противодействие выпуску).
- Требования к ГСМ (например, возможность работать на легких и тяжелых топливах).
- Экономические соображения, определяемые сферой применения двигателя (допустимость применения дорогостоящих и дефицитных материалов, технологических процессов и т.п.).
- На основании какой нормативной базы проектируется двигатель

Как правило, любая проектная организация ориентирована на определенный класс СТС. В качестве примера рассмотрим порядок проектирования ДВС. В первую очередь анализируется возможность создания нового образца при сохранении размерности цилиндра, принятого на данной производственной базе. При этом вначале рассматривается вариант изменения уровня форсировки по наддуву, и по средней скорости поршня, если эти показатели ниже достигнутого для данного класса дизелей мирового уровня. Если нет возможности получить заданную мощность таким способом, рассматривается вариант по наращиванию числа цилиндров или изменению компоновочной схемы. Если нет возможности вписаться в заданные габариты, переходят к выбору новой размерности цилиндра. Этот вариант проектирования требует согласования с производственной базой. Таким образом, в современных условиях высокой конкуренции уже на стадии разработки ТЗ практически осуществляется нулевой цикл проектирования. В качестве элемента САПР на данном этапе рекомендуется создать и постоянно обновлять базу данных по техническим характеристикам и массогабаритным показателям лучших образцов данного класса двигателей.

На стадии эскизного проекта разрабатываются чертежи общих видов наиболее важных групп двигателя (ЦПГ, камеры сгорания), разрабатываются чертежи общих видов двигателя в целом, принимаются конструкционные материалы и выдаются технические задания на разработку отдельных систем. Эскизный проект состоит из чертежей, расчетной части и пояснительной записки. Расчетная часть в первую очередь включает теплотехнический расчет двигателя, на основании которого определяются требования к агрегату наддува, системам топливоподдачи и охлаждения. На этой стадии проектирования общепринятым элементом САПР является графический пакет и математическая модель двигателя, основанная на эмпирических зависимостях, где основные характеристики выбираются по прототипу. Трехмерное моделирование позволяет значительно ускорить разработку, исключая ошибки, вызванные вычерчиванием вручную чертежей отдельных видов.

На стадии технического проекта выполняется более детальная и углубленная проработка основных узлов, а также разрабатываются подробные общие виды двигателя. В современном двигателестроении широко используются унифицированные узлы и агрегаты. Поэтому задачей разработчика является максимальное использование в проекте выпускаемых специализированными предприятиями агрегатов и деталей топливной системы, системы смазки, охлаждения и автоматики. Турбокомпрессор как правило выбирается из существующего типо-размерного ряда. На стадии технического проекта выполняются углубленные расчеты рабочего процесса, расчеты процессов теплообмена, расчеты динамики и уравновешенности двигателя. При разработке технического проекта

наряду с графическим пакетом основным средством САПР являются специализированные программы аналитического класса, разработанные в отрасли. Использование одних и тех же графических пакетов на предприятиях, поставляющих комплектующие изделия, значительно сокращает сроки разработки технической документации, позволяя передавать чертежи комплектующих изделий по электронной почте и оперативно включать их в состав чертежей комплектного двигателя. Технический проект согласуется с заказчиком и с надзорными органами.

Рабочее проектирование состоит в разработке чертежей отдельных деталей и сборочных единиц, включающих указания по материалам, термической обработке, допускам и посадкам сопрягаемых деталей, чистоте обработки поверхности. Одновременно на производстве разрабатывается технологическая карта изготовления изделия, на основании которой могут вноситься отдельные изменения в рабочий проект.

Практическая проверка целесообразности конструкции и качества изготовления двигателя производится на первом (головном) комплектном двигателе. На испытаниях двигатель должен показать заявленную мощность, удельный расход топлива, удельный расход масла на угар, уровень шума и вибрации, уровень выброса вредных веществ в атмосферу. Если нет соответствия, в процессе доводочных испытаний вносятся коррективы в конструкцию двигателя. Затем двигатель испытывается с целью определения области допустимых режимов и соответствия ее техническому заданию. По результатам испытаний строятся рабочие характеристики двигателя. Если двигатель предназначен для привода генератора переменного тока, проводятся испытания в динамических режимах при мгновенных сбросах и набросах нагрузки по определенному закону с целью определения отклонения частоты вращения и соответствия его нормативным документам. На заключительном этапе испытаний определяются характеристики надежности и ресурсные показатели (наработка на отказ, время непрерывной работы без обслуживания, ресурс до переборки). На стадии испытаний существенное снижение трудоемкости достигается при использовании измерительно-вычислительного комплекса.

Несмотря на значительный прогресс в области автоматизации проектирования, конструктор остается главной творческой силой, способной принимать адекватные решения во всех случаях технических затруднений. Человек является синтезатором всех отдельных операций проектирования, выполненных с помощью САПР. На начальных этапах проектирования только главный конструктор может представить мысленно двигатель в целом и создать общий компоновочный план в виде эскизного проекта. Человек также анализирует результаты расчета аналитических программ, без чего нет возможности указать направления необходимых изменений для улучшения конструкции. Вторым направлением творческой деятельности человека является совершенствование программного обеспечения САПР.

2. Состав и классификация САПР СТС

Типовая САПР включает две основные составляющие – информационно – программное обеспечение и технические средства. Состав типовой САПР приведен на рис.2.

Методическое обеспечение – инструкции для операторов системы, программистов и пользователей САПР, комплексы тестовых задач, предназначенных для проверки работоспособности системы.

Лингвистическое обеспечение включает язык проектирования, на котором происходит диалог конструктора с системой и элементы языка управления заданиями, используемыми для организации вычислительных процессов на ЭВМ. В настоящее время все программы снабжены оболочками, позволяющими общаться без изучения машинных команд.



Рис.2 Состав типовой САПР

. Общение происходит на уровне выбора команды из меню и задания численных значений параметров по запросу программы. Могут также создаваться в текстовых редакторах файлы исходных данных для расчета, в которых порядок и формат ввода параметров описан в инструкции по работе с программой.

Математическое обеспечение – включает расчетные программы, созданные непосредственно для конкретной САПР и универсальные пакеты, предназначенные для решения определенного типа задач (расчеты прочности и тепловой напряженности деталей).

Информационное обеспечение. В настоящее время типовая СУБД, включенная в пакет Microsoft Office – Microsoft Access. До этого была распространена СУБД FoxPro. Базы данных создаются Access и являются универсальными для всех пользователей операционной системы Windows.

Графическое обеспечение. Наиболее распространена система Autocad со специализированными приложениями в области архитектуры, строительства, машиностроения, геодезии. Используются также пакеты Компас, Pro Ingenering. 3D Solid и другие.

Техническое обеспечение. В качестве ЭВМ наиболее распространены ПВМ на базе процессоров Intel Pentium. Наиболее распространена комплектация САПР, включающая сервер, персональные компьютеры в качестве автоматизированных рабочих мест и графические станции, обеспечивающие рисование сложных объектов в трехмерном виде.

Определение САПР по ГОСТ 23501.0-79:

САПР представляет собой организационно-техническую систему, состоящую из комплекса средств автоматизации проектирования, взаимосвязанную с подразделениями проектной организации, выполняющей автоматизированное проектирование.

Следовательно, это комплексная система проектирования, в которой объединены человек (пользователь и разработчик САПР), и технические средства, используемые им в процессе разработки новой технической системы.

Классификация САПР по следующим основным признакам:

Тип объекта проектирования (САПР изделий машиностроения, приборостроения, САПР технологических процессов, САПР объектов строительства, САПР организационных систем)

Разновидность объектов проектирования (САПР ДВС)

Сложность объектов проектирования (до 10^2 элементов – простые объекты, от 10^2 до 10^3 - средней сложности, от 10^3 до 10^4 – сложные, более 10^4 элементов – очень высокой сложности).

Уровень автоматизации проектирования (низкоавтоматизированные – до 25% всех операций выполняется автоматизированными средствами, среднеавтоматизированного проектирования от 25 до 50%, высокоавтоматизированного проектирования – свыше 50% автоматизированы).

Комплексность автоматизации проектирования (одноэтапные и комплексные САПР).

Характер выпускаемых проектных документов (Разделение по типу конструкторской документации, получаемой на выходе: САПР текстовых документов, САПР графических документов, на бумаге, на машинных носителях, на фотоносителях).

Число выпускаемых проектных документов (малой производительности до 10^5 документов в год, средней до 10^6 , высокой – свыше 10^6).

Число уровней в системе технического обеспечения (одноуровневые ориентированы на ЭВМ высокого уровня (ЕС 1045, ЕС1060), двухуровневые – включают состыкованные с ЭВМ высокого уровня автоматизированные рабочие места, дополнительно включают графопостроители, комплекты управляющих программ для станков с ЧПУ).

САПР ДВС: - САПР изделий машиностроения (ДВС), проектирующая сложные объекты с числом элементов свыше 10^3 , низкоавтоматизированная, многоэтапная, графических и текстовых документов на бумаге и машинных носителях, малой производительности, двухуровневая. **Код такой системы: САПР ДВС 3.1.2.5.1.2.**

3. Математическое моделирование

3.1 Типы математических моделей

Математическое моделирование – формализация реальных процессов в технике и в природе до уровня алгебраических и аналитических выражений, упорядоченных алгоритмом расчета, позволяющая предсказать параметры системы при определенных внешних воздействиях.

1. Статистические и эмпирические математические модели, полученные в результате обработки проведенной серии экспериментов.

Основные типы зависимостей – полиномиальная и экспотенциальная.

Графические зависимости, полученные экспериментальным путем, в математической модели обычно могут аппроксимироваться полиномами:

$$y = a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2 + \dots + a_n \cdot x^n$$

Примером регрессивной модели полиномиального типа является характеристика турбокомпрессора, представленная в виде семейства зависимостей $\pi_k = f(V)$ при $\eta_k = \text{const}$.

В наиболее законченном экспотенциальном виде эмпирические зависимости имеют вид:

$$y = a_0 \cdot x_1^{K_1} \cdot x_2^{K_2} \cdot \dots \cdot x_n^{K_n},$$

где x_i – измеряемые параметры, y – искомый параметр, K_n – эмпирические коэффициенты. Примером такой зависимости является предложенный А.К. Костиным критерий для сравнительной оценки теплонапряженности деталей ЦПГ:

$$\bar{q}_{\text{п}} = b \cdot c_m^{0.5} \cdot (P_e \cdot g_e \cdot \frac{T_k}{T_{\text{он}}})^{0.88} \cdot (\frac{D}{P_k})^{0.38}$$

Недостатки эмпирических моделей:

- нет объяснения напрямую физических процессов, а лишь отражается влияние тех или иных параметров, которые можно измерить, на исследуемый процесс;
- результат, полученный на одном двигателе, или группе двигателей одного класса, не всегда могут быть распространены на другие типы двигателей.

Преимущества:

- дают возможность достаточно точно провести моделирование процесса в условиях незавершенной разработки теории исследуемых процессов;
- без предварительного анализа огромного количества экспериментальных данных и полученных на их основе эмпирических зависимостей нет возможности разработать теорию процесса.

В теории ДВС на основе анализа широко применяемого закона Вибе для выгорания топлива в цилиндре ДВС и «двугорбой» модели динамики тепловыделения разработана теория процесса смесеобразования и сгорания топлива в цилиндре, где процесс сгорания разделен на две фазы - диффузионную и термокинетическую.

Полученная экспериментальным путем близкая к квадратичной зависимость механического к.п.д. двигателя от частоты его вращения позволила рассматривать трение в деталях ЦПГ как гидродинамический процесс.

2. Аналитические математические модели строятся на основании представлений о физике процессов, происходящих в технических системах и в природе, путем упрощения их до уровня возможности решения современными математическими методами.

Можно отметить, что законы термодинамика были сформулированы для идеального газа при допущении, что между молекулами газа отсутствует взаимодействие, а сами они рассматриваются как материальные точки, равномерно распределенные и хаотически движущиеся в занимаемом газом объеме.

Основное достоинство аналитических моделей – возможность предсказать поведение объекта без проведения экспериментов, поэтому аналитические модели стоят на порядок выше эмпирических.

Недостатком аналитических моделей при моделировании СТС является отсутствие возможности решения в общем виде дифференциальных уравнений математической физики, которыми описываются происходящие процессы. При моделировании ДВС эти уравнения имеют аналитическое решение только для узкого

класса задач и в достаточно простых границах области. Поэтому приходится вводить ряд упрощений, которые приводят к некоторой потере точности метода. В настоящее время аналитические модели широко распространены в расчетах практике рабочего процесса при проектировании ДВС.

3. Численные (дискретные) математические модели позволяют получить дискретные значения функции в определенных, наперед заданных узловых точках, не давая ее непрерывного значения.

Степень точности данных методов в основном определяется шагом задаваемой сетки и порядком аппроксимирующих полиномов.

Применяется три основных метода: метод конечных разностей (МКР), конечных элементов (МКЭ) и интегральных граничных уравнений (МГУ).

Недостатки:

- необходимо правильно задать граничные условия, для расчета которых необходима высокая квалификация пользователя пакета МКЭ и выполнение предварительных расчетов на упрощенных моделях аналитического класса с использованием эмпирических зависимостей.

Преимущества:

- позволяют получить высокую точность расчетов механических и термических напряжений в деталях сложной конфигурации, главным образом в местах концентрации напряжений, и являются основным инструментом в прочностных расчетах деталей при конструировании двигателя.
- позволяют оптимизировать конфигурацию деталей КС, полостей для охлаждающей жидкости, впускных и выпускных коллекторов на основе решения задач теплопроводности, термоупругости, гидродинамики и газодинамики.

При конструировании ДВС используются модели всех трех типов.

3.1.1 Критерии оценки математической модели

Критериями эффективности математической модели являются точность, экономичность и достоверность.

Точность моделирования оценивается отклонением расчетной величины параметра от его математического ожидания, полученного в результате экспериментов. При математическом моделировании возникают погрешности, вызванные несовершенством методики и погрешности, связанные с принятой точностью расчета параметров в итерационных циклах. Погрешности второго рода устранимы при неограниченных ресурсах машинного времени.

Экономичность модели определяется затратами на машинное время, память и подготовку данных для расчета.

При выборе точности расчета необходимо установить компромисс между точностью моделирования и экономичностью. При этом целесообразно ограничиться точностью расчета, не превышающей точности измерения рассчитываемой величины.

Достоверность модели оценивается идентичностью характера изменения рассчитанных величин параметров и их измеренных значений во всем диапазоне рабочих режимов СТС.

В случае невозможности выполнения эксперимента достоверность модели может оцениваться путем сопоставления результатов моделирования с результатами расчетов по апробированным экспериментально другим методикам.

3.2 Упрощенная математическая модель четырехтактного двигателя с наддувом и алгоритм расчета нагрузочной характеристики

На начальной стадии проектирования очень полезно рассчитать характеристики двигателя для предоставления их заказчику.

Данная математическая модель предназначена для расчета характеристик двигателя в первом приближении.

В основу расчета характеристики двигателя положено совместное решение уравнений, определяющих :

- гидравлическую характеристику поршневой части
- расходную характеристику турбины
- материальный и тепловой балансы двигателя
- энергетический баланс турбины и компрессора.

При этом расчет характеристик турбопоршневого двигателя (ТПД) производится по средним параметрам, определяющим в целом работу двигателя за цикл. Отвод тепла в окружающую среду и индикаторный к.п.д. двигателя вычисляются с помощью полуэмпирических зависимостей, полученных для конкретных типов двигателей. В качестве исходных данных используются параметры номинального режима.

Массовый расход воздуха через цилиндры четырехтактного двигателя равен

$$G_{дв} = iV_h * \frac{n}{120} * \frac{P_k}{R_B T_k} * \eta_v * \varphi_{пр} \quad \text{кг/с} \quad (1)$$

где i - число цилиндров,

V_h – рабочий объем цилиндра, м^3 ;

n - частота вращения коленчатого вала, об/мин,;

P_k, T_k - давление в кг/м^2 и температура в $^\circ\text{К}$ воздуха в ресивере;

η_v - коэффициент наполнения;

$\varphi_{пр}$ – коэффициент продувки;

R_B – газовая постоянная, для воздуха $R=29,3$ ккал/кг $^\circ\text{К}$ (287кДж/кг $^\circ\text{К}$).

Расход газа через турбину:

$$G_T = \mu_T * F_c * \frac{P_T \psi_T}{\sqrt{R_T T_T}} \quad \text{кг/с} \quad (2)$$

где F_c – конструктивное сечение соплового аппарата турбины, м^2 ;

μ_T – коэффициент расхода;

P_T – давление газа перед турбиной, кг/м^2 ;

T_T – температура газа перед турбиной, $^\circ\text{К}$;

ψ_T – функция расхода газа, зависящая от отношения давлений перед и за турбиной.

Материальный баланс двигателя:

$$G_T = G_{дв} + G_T - G_{ут} \quad \text{кг/с} \quad (3)$$

где G_T - расход топлива, кг/с;

$G_{ут}$ – утечки газа, кг/с.

Тепловой баланс дизеля можно представить в виде следующего уравнения:

$$T_T = \frac{14,33 \cdot \alpha_{\Sigma} \cdot c_{РВТк} \cdot T_K + Q_H^P \cdot (1 - \eta_i - q_{охл} - \Psi_{нсг})}{(14,33 \cdot \alpha_{\Sigma} + 1) \cdot c_{РГТ_T}} \text{ } ^\circ\text{К}, \quad (4)$$

где 14,33 – теоретически необходимое количество воздуха для сгорания 1 кг топлива среднего состава;

α_{Σ} - суммарный коэффициент избытка воздуха;

$c_{РВТк}$ - массовая теплоемкость воздуха при температуре T_K , ккал/кг $^\circ\text{К}$ (кДж/кг $^\circ\text{К}$);

Q_H^P – низшая теплота сгорания топлива, ккал/кг (кДж/кг);

η_i - индикаторный к.п.д. ;

$q_{охл}$ - доля теплоты, отводимой в охлаждающую среду в цилиндре двигателя;

$\Psi_{нсг}$ – доля тепловых потерь от неполноты сгорания топлива;

$c_{РГТ_T}$ – массовая теплоемкость выпускных газов при T_T , ккал/кг $^\circ\text{К}$ (кДж/кг $^\circ\text{К}$).

Уравнение энергетического баланса турбины и компрессора:

$$\frac{k_B}{k_B - 1} \cdot R_B \cdot G_{дв} \cdot T_0 \left(\pi_K \frac{k_B}{k_B - 1} - 1 \right) = \frac{k_T}{k_T - 1} \cdot R_T \cdot G_T \cdot T_T \left(1 - \frac{1}{\pi_T \frac{k_T - 1}{k_T}} \right) \cdot \eta_{ТК} \quad (5)$$

где k_B - показатель адиабаты сжатия воздуха в компрессоре;

k_T - показатель адиабаты расширения газов в турбине;

T_0 - температура воздуха на всасывании компрессора, $^\circ\text{К}$;

π_K - степень повышения давления в компрессоре;

π_T - степень расширения газов в турбине;

R_B, R_T - газовая постоянная для воздуха и газов, для практических расчетов ее значение может приниматься одинаковым и равным 29,3 ккал/кг $^\circ\text{К}$ (287кДж/кг $^\circ\text{К}$).

Система уравнений 1-5 решается методом итераций. При расчете характеристик двигателя необходимо найти связь таких параметров, как индикаторный к.п.д. η_i , механический к.п.д. η_m , теплоотвод в цилиндре $q_{охл}$ и других с режимом работы двигателя и его системы воздухообеспечения. При этом подразумевается, что все эти данные имеются для номинального режима работы двигателя.

Расчет характеристик основан на предложенном Д.А. Портновым методе нахождения относительных зависимостей параметров двигателя от режима его работы (относительной мощности и относительной частоты вращения).

Схема и порядок расчета нагрузочной характеристики ТПД приведены в приложении 1

3.3 Метод экспертных оценок

При анализе технических решений, принимаемых на начальных стадиях проектирования СТС, очень часто применяется метод экспертных оценок. Альтернативные технические решения рассматриваются в виде готовых к использованию объектов, обладающих определенным набором свойств. Эти свойства и выглядят как признаки, по которым выбирается наилучший объект. Однако наличие этих свойств не

является достоверным событием. Здесь полагаются на опыт и интуицию экспертов. Для выполнения экспертной оценки создается опросный лист. Разработка опросного листа является очень важной задачей и поручается ответственному исполнителю, изучающему предварительно преимущества и недостатки объектов, проявляющиеся на стадиях изготовления и эксплуатации СТС. К таким признакам относятся:

- сложность изготовления
- стоимость изготовления
- надежность в эксплуатации
- массогабаритные характеристики
- экономическая эффективность при эксплуатации.

Простое перечисление указанных признаков не может рассматриваться как готовый опросный лист. Необходимо выявить и перечислить в качестве критериев отбора положительные и отрицательные стороны каждого объекта на уровне конструктивных узлов, подлежащих разработке. Но указать количественные характеристики этих признаков по каждому объекту нет возможности ни у кого. Структура опросного листа может иметь следующий вид:

| Обозначение | Критерий отбора | Весовой коэффициент критерия | Объекты | | | | | |
|-------------|-----------------|------------------------------|-------------------------------|--------|-------------------------------|--------|-------------------------------|--------|
| | | | а | | б | | с | |
| | | | Описание признака для объекта | Оценка | Описание признака для объекта | Оценка | Описание признака для объекта | Оценка |
| | K_1 | M_1 | | | | | | |
| | K_2 | M_1 | | | | | | |
| | K_3 | M_1 | | | | | | |
| | ... | ... | | | | | | |
| | K_n | M_1 | | | | | | |
| | | $\sum_n M_i = 1$ | $\sum_n K_i M_i$ | | $\sum_n K_i M_i$ | | $\sum_n K_i M_i$ | |

Шкала оценок может быть разной - например, 5 10 или 100 балльной. Уровни значимости каждого критерия могут выставляться экспертами или выдаваться разработчиком опросного листа. Последнее предпочтительнее, если эксперты являются специалистами в узких областях. Оценка объекта каждым экспертом вычисляется как сумма произведений оценок по каждому критерию на его весовой коэффициент. В простейшем случае оценка объекта определяется как среднее арифметическое оценок всех экспертов. Могут быть применены методы статистического анализа, например, основанные на нахождении среднего квадратичного отклонения и отбрасывании недостоверных результатов. Необходимо стремиться к увеличению количества критериев отбора и количества экспертов, не снижая при этом уровня компетентности специалистов.

4. Структура расчетного блока САПР ДВС. Проблемно-ориентированные блоки

Структура расчетного блока САПР ДВС, предназначенной для конструирования двигателя представлена на рис. 3.

Основными компонентами приведенной на рис.3 схемы САПР ДВС являются проблемно-ориентированные блоки, в которых производится моделирование условий работы и расчет различных узлов и агрегатов двигателя. В свою очередь, каждый из

проблемно-ориентированных блоков представляет по своей структуре комплекс программ различных уровней сложности, применяющихся на разных стадиях проектирования ДВС.

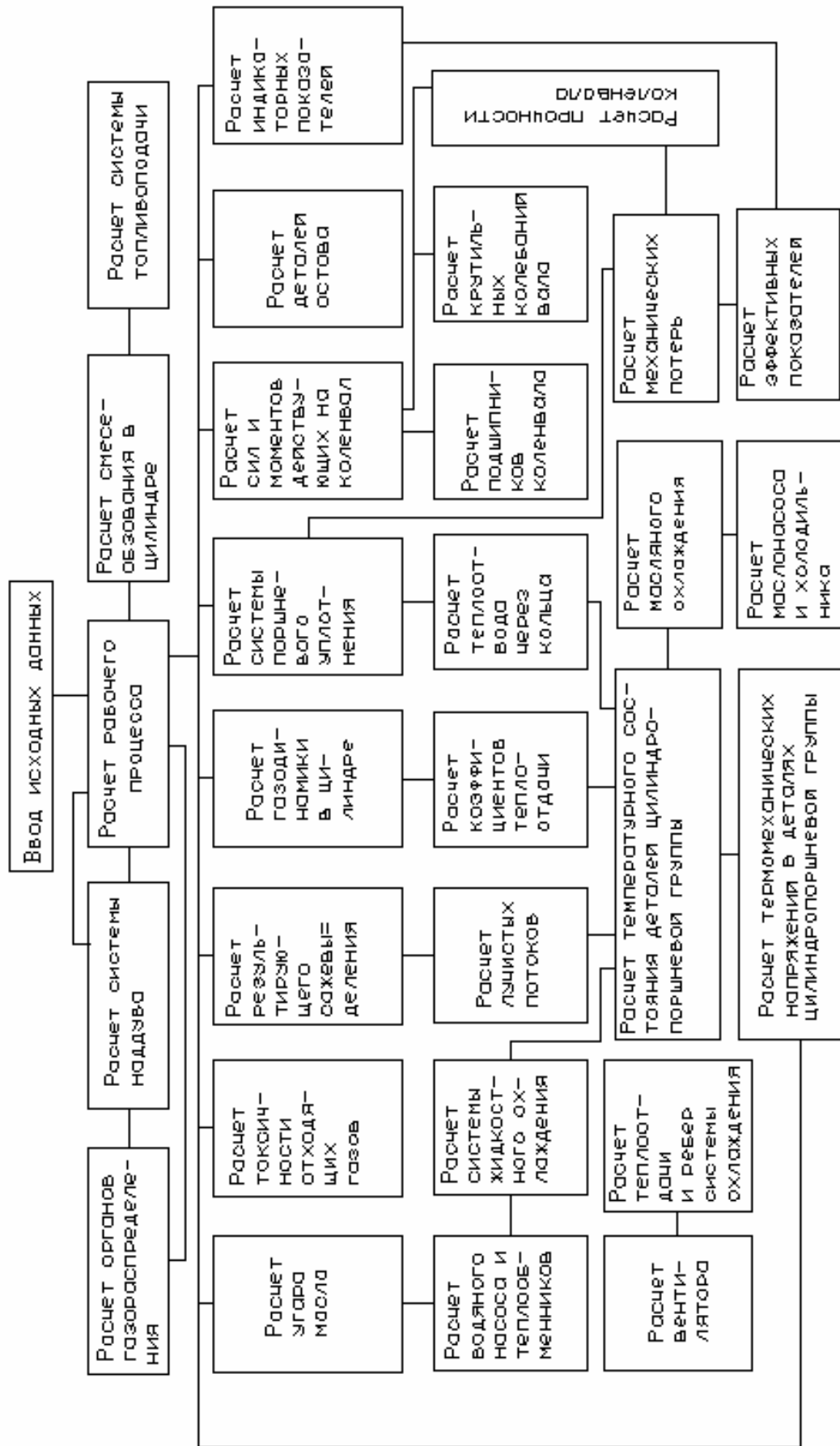


Рис.3 Структурная схема расчетного блока САПР ДВС

4.1 Блок расчета рабочего процесса.

Расчет рабочего процесса является основой для задания исходных данных практически для всех остальных блоков. Задача расчета рабочего процесса – многоуровневая, поскольку для ее выполнения в достаточно точном виде требуется задание геометрических размеров цилиндра, номинальной частоты вращения коленчатого вала, фаз газораспределения, допустимых значений максимального давления сгорания и средней температуры стенки цилиндра, параметра, определяющего скорость сгорания и других.

Все уровни моделирования строятся на аналитических соотношениях, полученных на базе первого закона термодинамики. Однако вид задаваемых зависимостей, описывающих процессы тепловыделения и газообмена, усложняются по мере углубления разработки проекта двигателя.

На нулевом этапе проектирования применяется расчет по методу Гриневецкого – Мазинга. В данном случае реальный закон выделения теплоты заменяется коэффициентом использования энергии сгоревшего топлива по условным фазам сгорания (при постоянном объеме, давлении и расширении). Давления во впускном и выпускном коллекторах принимаются постоянными, теплообмен в камере сгорания учитывается количеством выделенного тепла.

Первым уровнем моделирования рабочих процессов является использование зависимостей, полученных на базе первого закона термодинамики с добавлением зависимостей, описывающих закон выделения тепла (в виде формул Вибе, Пугачева и других), а также реальных законов изменения проходного сечения впускных и выпускных клапанов. Данная методика учитывает наличие теплообмена в камере сгорания, используя упрощенные зависимости.

Основные уравнения для методики этого уровня имеют вид:

-для такта расширения и сжатия:

$$\frac{dp}{d\phi} = p \left(-\frac{k}{V} \cdot \frac{dV}{d\phi} + \frac{Q_H \cdot g_{II}}{Mc_v T} \cdot \frac{dx}{d\phi} + \frac{1}{Mc_v T} \cdot \frac{dQ_w}{d\phi} \right),$$

где p, T – давление и температура в цилиндре, V – текущий объем цилиндра, c_v – теплоемкость рабочего тела, $\frac{dx}{d\phi}$ – дифференциальная характеристика (скорость тепловыделения, Q_H – низшая теплотворная способность топлива, M – масса заряда;

-для тактов газообмена:

$$\frac{dp}{d\phi} = \begin{cases} p \left(-\frac{k}{V} \cdot \frac{dV}{d\phi} + \frac{k}{M} \cdot \frac{dM}{d\phi} + \frac{1}{Mc_v T} \cdot \frac{dQ_w}{d\phi} \right) & \text{-- впуск} \\ p \left(-\frac{k}{V} \cdot \frac{dV}{d\phi} + \frac{c_p^0 \cdot T_k}{Mc_v T} \cdot \frac{dM}{d\phi} + \frac{1}{Mc_v T} \cdot \frac{dQ_w}{d\phi} \right) & \text{-- выпуск} \\ p \left(-\frac{k}{V} \cdot \frac{dV}{d\phi} + \frac{c_p^0 \cdot T_k}{Mc_v T} \cdot \frac{dM_1}{d\phi} - \frac{k}{M} \cdot \frac{dM_2}{d\phi} - \frac{1}{Mc_v T} \cdot \frac{dQ_w}{d\phi} \right) & \text{-- продувка} \end{cases}$$

где c_p^0 , T_k – параметры рабочего тела на впуске в камеру.

Блок – схема программы, реализующая методику расчетов первого уровня, приведена на рис. 4. При удачном подборе закона выделения тепла данная методика может дать точность расчета номинального режима порядка 2-3% и обеспечить исходные данные для блоков расчетов тепловой напряженности и прочностных расчетов деталей движения. Однако для расчета характеристик двигателя такая методика может давать существенные погрешности из-за принятия постоянными давления и температур на впуске и на выпуске из цилиндра. В методиках второго уровня эти упрощения не принимаются.

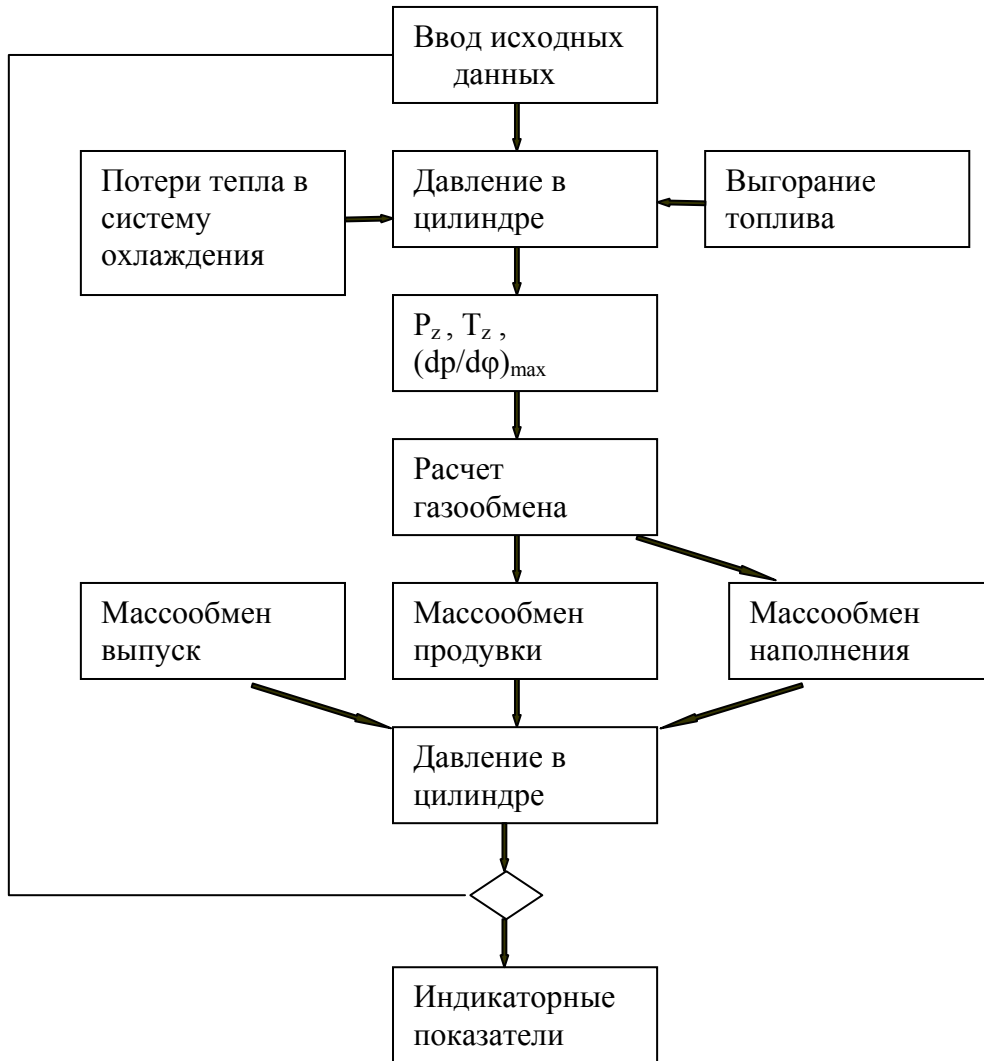


Рис.4 Блок-схема расчета рабочего процесса двигателя.

Методика второго уровня реализована в программе «Импульс», использовавшейся в СССР с середины 1975г. в качестве стандартной отраслевой программы для расчета и исследований рабочего процесса. В качестве математической модели рабочего процесса принята следующая система уравнений:

$$(c'_v G' + c''_v G'') \frac{dT}{d\phi} + u' \frac{dG'}{d\phi} = Q_H \cdot g_{II} \frac{dx}{d\phi} + \frac{dQ_w}{d\phi} - 0,1605D^2 \cdot S \cdot b \cdot p + i_n \frac{dG_n}{d\phi} - i_m \frac{dG_m}{d\phi} \quad (1)$$

$$\frac{dG'}{d\phi} = r'_n \frac{dG_n}{d\phi} - r'_m \frac{dG_m}{d\phi} - L_0 \frac{dx}{d\phi} \cdot g_{II} \quad (2)$$

$$\frac{dG''}{d\varphi} = r_n'' \frac{dG_n}{d\varphi} - r_m'' \frac{dG_m}{d\varphi} + (L_0 + 1) \frac{dx}{d\varphi} \cdot q \frac{dx}{d\varphi} \quad (3)$$

$$P = 10^{-4} \cdot R V_c \cdot \frac{T}{\varepsilon_x} \cdot (G' + G'') \quad (4)$$

где φ – угол поворота коленчатого вала,
 P, T, u, i – давление, температура и удельная энтальпия смеси в цилиндре;
 значком (') обозначены параметры чистого воздуха, значком (') – параметры чистых продуктов сгорания;

c, G, r – удельная теплоемкость, масса и доля чистого воздуха или продуктов сгорания;

индекс «n» означает параметры газа перед органами впуска, индекс «m» перед органами выпуска;

$$b = \frac{ds}{d\varphi} \quad \text{- относительная скорость поршня;}$$

ε_x – текущая степень сжатия;

$g_{ц}$ – цикловая подача топлива;

$$\frac{dx}{d\varphi} \quad \text{- относительная скорость сгорания топлива.}$$

Уравнение (1) выражает закон сохранения энергии в дифференциальной форме. В левой части записана скорость изменения внутренней энергии содержимого цилиндра, в правой части – сумма скоростей подвода и отвода теплоты за счет сгорания топлива, теплообмена, работы перемещения поршня, прибыли и убыли энтальпии за счет газообмена.

Уравнения (2) и (3) представляют скорость изменения количества чистого воздуха и чистых продуктов сгорания. Уравнение (4) – это уравнения состояния для содержимого цилиндра в произвольный момент времени.

При расчете математическая модель обеспечивает замкнутое моделирование рабочего процесса, газообмена и наддува и дает возможность определить характеристики двигателя в области возможных режимов в зависимости от подачи топлива и частоты вращения коленчатого вала. При моделировании номинального режима производится настройка рабочего процесса и системы наддува. На режиме настройки автоматически определяется регулировка подачи топлива и параметры системы воздухообмена (сечение соплового аппарата турбины, расчетные параметры ТК, коэффициенты гидравлических и тепловых потерь) по задаваемым допустимым значениям $P_z, \eta_{ТК}$ и другим величинам.

Анализ основных уравнений, применяемых в методиках первого и второго уровня, показывает, что наиболее важной частью модели является правильный выбор закона сгорания топлива.

Эмпирическая зависимость, предложенная И.И. Вибе имеет вид:

$$x = 1 - e^{-6,908 \left(\frac{\varphi}{\varphi_z} \right)^{m+1}},$$

где φ_z – условная продолжительность сгорания, m – показатель жесткости сгорания.

Эмпирическая зависимость, предложенная Б.П. Пугачевым, реализует «двугорбую» модель выделения тепла, где процесс сгорания разделен на две фазы – кинетическую и диффузионную:

$$x = x_1 \left(1 - e^{-\frac{\kappa_1 - 1}{\kappa_1} \left(\frac{\varphi}{\varphi_1} \right)^{\kappa_1}} \right) + x_2 \left(1 - e^{-\frac{\kappa_2 - 1}{\kappa_2} \left(\frac{\varphi}{\varphi_2} \right)^{\kappa_2}} \right),$$

где x_1 и x_2 – соответственно доли топлива, выделившиеся в диффузионной и кинетической фазах сгорания, φ_1 и φ_2 – условные продолжительности сгорания в каждой фазе, κ_1 и κ_2 – показатели жесткости сгорания. Все коэффициенты в приведенных формулах – эмпирические, и зависят от формы камеры сгорания, уровня форсировки двигателя и характеристик топливоподачи. Имея подбор этих показателей для существующих прототипов, можно с достаточной степенью точности моделировать новый двигатель вплоть до рабочей стадии проектирования.

4.3 Блок расчета топливоподающей аппаратуры.

Назначение блока – расчет характеристик подачи топлива в цилиндр двигателя. На начальной стадии проектирования по заданной цикловой подаче, давлению и угловой продолжительности впрыска топлива на основании проектных рекомендаций определяются:

- основные геометрические размеры ТНВД,
- профиль кулачка привода ТНВД,
- тип и размеры форсунки, давление затяга иглы форсунки, количество и размеры сопловых отверстий,
- диаметр и длина трубопровода высокого давления.

Эти данные и теплофизические характеристики топлива являются входными параметрами в расчетный блок. На выходе из расчетного блока получают следующие характеристики:

- цикловую подачу топлива $g_{ц}$,
- давление перед иглой форсунки $P_{вп}$,
- расходную характеристику подачи топлива в цилиндр.

Методика расчета построена на базе численного решения одномерных уравнений движения топлива и сплошности в каждом конструктивном элементе топливоподающей аппаратуры.

4.3 Блок расчета газодинамики в цилиндре.

Назначение блока – обеспечить задание граничных условий теплообмена по конвективным и лучистым тепловым потокам во все тепловоспринимающие поверхности камеры сгорания для последующего расчета температурного состояния деталей двигателя.

В качестве параметров глобального входа в расчетный блок используются конструктивные параметры двигателя и камеры сгорания: частота вращения, расход топлива, характеристика его подачи и сгорания, теплофизические характеристики рабочего тела, а также текущие параметры рабочего тела – давление и температура.

На выходе из блока получают мгновенную и усредненную за цикл плотность конвективных и лучистых тепловых потоков, а также мгновенные эпюры распределения усредненных скоростей воздушного заряда, вызванных возвратно-поступательным движением поршня и начальной закруткой заряда.

В качестве методики нулевого уровня, применяемой в данном блоке, для расчета коэффициента теплоотдачи от газа к стенке применяются эмпирические зависимости (формулы Эйхельберга, Пфлаума, Вошни).

На первом уровне реализации данного блока используется методика, основанная на аналитическом расчете скоростей обтекания камеры сгорания. При этом основным допущением является предположение о наличии ламинарного пограничного слоя при турбулентном характере движения заряда в камере сгорания. Расчет скоростей обтекания производится на базе решения уравнения Фурье. Лучистый теплообмен вычисляется по упрощенной схеме по эмпирической зависимости. Блок-схема расчета эпюр тепловой нагрузки для модели первого уровня приведена на рис. 5. Основным недостатком модели первого уровня являются достаточно жесткие ограничения по форме камеры сгорания. Для конструирования камеры сгорания произвольной формы необходимо применять модель второго уровня – численную, когда решение уравнений для определения скоростей обтекания стенок производится на базе метода конечных элементов.



Рис.5 Блок-схема расчета газодинамики в цилиндре ДВС

4.4 Блок расчета теплонапряженности.

Расчет температурного состояния деталей цилиндропоршневой группы является одним из наиболее сложных и ответственных. Из-за сложной конфигурации деталей и переменных характеристик рабочего тела локальные тепловые потоки по поверхности поршня и камеры сгорания отличаются от средних значений в 2-2,5 раза. До внедрения в практику расчетов методов конечных элементов самым надежным способом определения

температурного состояния являлись экспериментальные исследования. В настоящее время для расчетов термомеханических напряжений в деталях ЦПГ применяются унифицированные пакеты, основанные на МКЭ. Примером такого пакета является «Космос».

В качестве исходных данных вводится трехмерная модель детали, свойства материалов, тепловой поток, или локальные значения коэффициентов теплоотдачи, или температуры поверхностей через которые осуществляется теплопроводность. Основные размеры деталей и конструктивные соотношения выбираются на основании проектных рекомендаций и по имеющимся прототипам. Наибольшую трудоемкость при подготовке исходных данных представляет построение трехмерной модели. В результате расчета получают распределение напряжений по поверхностям и любым сечениям, проходящим через узловые точки, а также деформации поверхностей. Вторым распространенным пакетом расчета МКЭ является ANSYS. По сравнению с «Космосом» он обладает более широкими возможностями и позволяет объединять расчеты газодинамики и термомеханического напряженного состояния.

4.5 Блок расчета прочности деталей движения.

Основные предварительные размеры деталей движения на нулевом этапе проектирования выбираются по прототипу или в соответствии с рекомендуемыми конструктивными соотношениями и проверяются на соответствие нормативным документам. Например, для морских дизелей диаметры шеек коленчатого вала и толщины щек проверяются по формулам Морского регистра. После выбора материалов определяется масса деталей КШМ и выполняется динамический расчет двигателя.

КШМ во время работы двигателя подвергается действию сил: давления газов на поршень, инерции движущихся масс механизма, веса отдельных деталей, трения в звеньях механизма и сопротивления приемника энергии. При расчете динамики КШМ силы трения обычно не учитываются.

Исходными данными для расчета динамики являются: индикаторная диаграмма, массы и расположение центров тяжести вращающихся и поступательно движущихся масс, углы заклинки коленчатого вала и порядок вспышек в цилиндрах. В результате динамического расчета определяются средние и амплитудные значения сил и моментов, действующих на каждую шейку коленчатого вала, определяется неравномерность крутящего момента и хода коленчатого вала.

Результаты динамического расчета являются исходными данными для расчета коленчатого вала, шатуна и поршневого пальца на усталостную прочность по методу Р.С. Кинасошвили и для расчета деталей остова.

4.6 Блок расчета трибологии и выгорания смазки.

Трибология – научное направление, изучающее взаимодействие поверхностей, движущихся одна относительно другой и испытывающих взаимное трение. Целью трибологических исследований является увеличение ресурса рабочих элементов. При конструировании ДВС трибологические исследования проводятся применительно к подшипникам скольжения вращающихся деталей и поршневым кольцам.

Назначение блока расчета подшипников скольжения ДВС – выдача локальных мгновенных значений толщины смазочного слоя и расчет мощности механических потерь в узле трения.

Математическая модель процесса формирования смазочного слоя подшипника основана на совместном решении уравнений динамики вала и гидродинамики смазочного слоя в трущейся паре.

На нулевом уровне проектирования используется предложенный А.К. Дьячковым метод расчета подшипников по коэффициенту нагруженности:

$$\Phi = \frac{k_{\text{ср}}}{100\eta \cdot \omega} \left(\frac{\Delta}{d} \right)^2,$$

где d – диаметр вала, мм;

Δ – диаметральный зазор, мк;

ω – угловая скорость вала, 1/сек;

η – динамическая вязкость масла, кг·сек/м²

$k_{\text{ср}}$ – среднее удельное давление на проекцию подшипника за цикл в начале расчета и среднее удельное давление в пике максимальных усилий после уточнения температуры масляного слоя, кг/см².

Расчет эксцентриситета и расхода масла производится по эмпирическим зависимостям.

Входными параметрами в блок расчета являются конструктивные размеры подшипника, диаграмма нагрузки подшипника, диаметр и частота вращения вала, свойства масла. В результате расчета получают минимальную теоретическую толщину масляного слоя, расчет тепла трения, расход и температуры масла на входе и выходе. На первом уровне производится расчет толщины смазочного слоя на базе решения уравнения Рейнольдса:

$$\frac{d}{dx} = \left(h \frac{dp}{dx} \right) + \frac{d}{dy} \left(h \frac{dp}{dy} \right) = 6\mu \cdot \omega \cdot R + 12\mu \frac{dh}{dl},$$

где p – гидродинамическое давление в подшипнике, h – радиальный зазор, μ – динамическая вязкость масла, ω – окружная скорость вала относительно цапфы, l – длина подшипника.

Уравнение решается численными методами. Входными параметрами в блок расчета являются конструктивные размеры подшипника, диаграмма нагрузки подшипника, диаметр и частота вращения вала, температура, расход и свойства масла. На выходе из расчетного блока получают распределение минимальных толщин смазочного слоя по углу поворота коленчатого вала, температуру масла на выходе из подшипника, мощность механических потерь в подшипнике.

Оптимизация подшипника заключается в обеспечении надежной работы и минимальных износов при минимизации потерь на трение и мощности масляного насоса. Эти требования противоречат друг другу. Основные дефекты подшипников связаны с задирами и износом антифрикционного слоя вкладышей. Первый дефект связан с уменьшением минимальных толщин смазочного слоя ниже допустимых пределов, второй – с превышением допустимого гидродинамического давления в смазочном слое. При этом толщина смазочного слоя, величина гидродинамического давления и мощность потерь трения прямо зависят от расхода масла через подшипник и его температуры. Поэтому в качестве одной из возможных задач оптимизации можно предложить следующую:

$$G_M + \lambda_1 f_{\text{тр}} + \lambda_2 \Delta t \rightarrow \min;$$

$$P_{\text{гд}} < P_{\text{гд}}^*, \quad h_{\text{min}} > h_{\text{min}}^*,$$

Где G_M – расход масла через подшипник, $f_{\text{тр}}$ – сила трения в подшипнике, Δt – подогрев масла в подшипнике, λ_1 и λ_2 – коэффициенты значимости, $P_{\text{гд}}$ и $P_{\text{гд}}^*$ – соответственно гидродинамическое давление в слое и его предельное значение, h_{min} и h_{min}^* – минимальная толщина смазочного слоя и ее предельное значение.

На долю поршневых колец приходится до 70% потерь на трение. Расчет характеристик трения в этом узле затруднен сложным характером физических процессов, происходящих в этом узле.

Основная функция колец – уплотнение рабочей полости цилиндра в условиях тепловых и механических деформаций втулки и поршня, что предопределяет наличие

зазора в замке поршневого кольца и утечки в картер двигателя рабочего. Второе назначение колец - теплоотвод от поршня во втулку цилиндра. Поэтому при составлении модели трибологии необходимо учитывать:

- большой (до 8-10 Мпа) и переменный по углу поворота коленчатого вала перепад давлений на кромках поршневого кольца;
- возможность свободного вращения колец,
- повышение температуры и изменение свойств масла за счет теплоотвода от поршня;
- развитие диссипативных явлений, и как следствие, повышение температуры при трении в тонком масляном зазоре между кольцом и втулкой;
- величину давления на стенки цилиндра, вызванную упругой деформацией кольца.

Составить модель работы кольцевого уплотнения на нулевом уровне не представляется возможным.

Аналитическая модель строится исходя из следующих предпосылок:

- ввиду малости толщины масляного слоя относительно размера цилиндра (она составляет величину 4-5 порядка) модель движение упрощается до перемещения плоских поверхностей;
- ввиду малых чисел Рейнольдса режим течения масла в зазоре ламинарный;
- через тонкий слой масла проходят мощные тепловые потоки, определяющие теплоотвод от поршня.

Аналитическая модель представляет систему следующих уравнений:
уравнение неразрывности

$$\frac{du_x}{dx} + \frac{du_y}{dy} + \frac{du_z}{dz} = 0$$

уравнение движения

$$\left. \begin{aligned} \frac{du_x}{dt} + u_x \frac{du_x}{dx} + u_y \frac{du_x}{dy} + u_z \frac{du_x}{dz} &= \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dx} + \nu \Delta u_x \\ \frac{du_y}{dt} + u_x \frac{du_y}{dx} + u_y \frac{du_y}{dy} + u_z \frac{du_y}{dz} &= \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dy} + \nu \Delta u_y \\ \frac{du_z}{dt} + u_x \frac{du_z}{dx} + u_y \frac{du_z}{dy} + u_z \frac{du_z}{dz} &= \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dz} + \nu \Delta u_z \end{aligned} \right\}$$

уравнение энергии

$$\frac{dT}{dt} + u_x \frac{dT}{dx} + u_y \frac{dT}{dy} + u_z \frac{dT}{dz} = a \Delta T + \frac{\mu}{\rho c_p} \frac{dp}{dx} \Phi(x, y, z),$$

где u_x, u_y, u_z – компоненты вектора скорости, ν – коэффициент кинематической вязкости масла при соответствующей температуре в зазоре, p - давление масла в зазоре, ρ – плотность масла, T – температура, a – коэффициент температуропроводности масла, Φ – диссипативная функция Релея, c_p – изобарная теплоемкость масла.

Функция Релея в данном случае имеет вид:

$$\Phi(x, y, z) = \left[\left(\frac{du_x}{dx} \right)^2 + \left(\frac{du_y}{dy} \right)^2 + \left(\frac{du_z}{dz} \right)^2 + \left(\frac{du_x}{dy} + \frac{du_y}{dx} \right)^2 + \left(\frac{du_x}{dz} + \frac{du_z}{dx} \right)^2 + \left(\frac{du_y}{dz} + \frac{du_z}{dy} \right)^2 \right]$$

Данная система уравнений вследствие нелинейности аналитического решения не имеет, и задачу решают путем упрощения исходных уравнений.

Параметрами входа в данный блок являются конструктивные параметры поршня и поршневых колец: профиль поршня, число поршневых колец, их высота, ширина, температуры, профили рабочей поверхности; теплофизические параметры смазочного масла, кривые изменения температуры и давления рабочего тела в камере сгорания, скорость поршня.

В качестве параметров выхода получают величины протечек рабочего тела, мгновенные локальные распределения толщины смазочного слоя под поршневыми кольцами, сила и мощность гидродинамического трения в комплекте, количество масла, сброшенного в дренаж, интенсивность тепловых потоков во втулку цилиндра.

Блок расчета угара масла в ДВС непосредственно связан с блоком расчета кольцевого уплотнения, поскольку основой расчета является толщина смазочного слоя, оставляемого на поверхности втулки первым компрессионным кольцом.

Аналитическая модель расчета масла на угар основана следующих предпосылках:

- считается, что испарение масла происходит с поверхности масляной пленки, оставляемой на поверхности втулки при ходе поршня от ВМТ к НМТ;
- прогрев масла происходит под действием теплового потока со стороны рабочего тела с учетом теплоотвода во втулку цилиндра;
- в зависимости от температуры смазочного слоя, а также от параметров рабочего тела в камере сгорания процесс испарения масла с поверхности втулки может иметь различных характер – диффузионный, термокинетический или критический.

Ввиду сложности определения теплофизических характеристик масла, задача решается численными методами для каждого выделенного пояса поверхности втулки, высота которого соответствует определенному угловому перемещению коленчатого вала.

Входными параметрами в расчетный блок являются давление, температура рабочего тела, теплофизические характеристики масла, толщины смазочного слоя, оставляемого на поверхности втулки первым компрессионным кольцом, интенсивность теплоотвода к огневой поверхности втулки, ее температура. На выходе из блока получают удельный расход масла на угар.

Упрощенная блок-схема расчета угара масла в ДВС представлена на рис. 6.

Для увеличения ресурса работы двигателя задача оптимизации кольцевого уплотнения может быть поставлена в следующем виде:

$$\bar{\delta}_\phi \rightarrow \max ;$$

$$\delta_{\min} > \delta_{\min}^* , g_m < g_m^* , P_{\text{тр}} < P_{\text{тр}}^* , T_m < T_m^* , G_{\text{тр}} < G_{\text{тр}}^* ,$$

где $\bar{\delta}_\phi$ - относительная толщина смазочного слоя, δ_{\min}^* - минимально допустимая толщина смазочного слоя под кольцом, g_m^* - максимально допустимый расход масла на угар,

$P_{\text{тр}}^*$ - максимально допустимое давление в смазочном слое, T_m^* - предельная температура смазочного слоя, $G_{\text{тр}}^*$ - предельная величина протечек в камеру сгорания.

Рассмотренные в данном разделе принципы построения математических моделей позволяют пользователю САПР установить очередность расчетов и выявить взаимосвязь

между отдельными проблемно-ориентированными блоками. Расчеты всегда производятся в несколько этапов с корректировкой исходных данных по результатам, полученным в смежных блоках САПР.

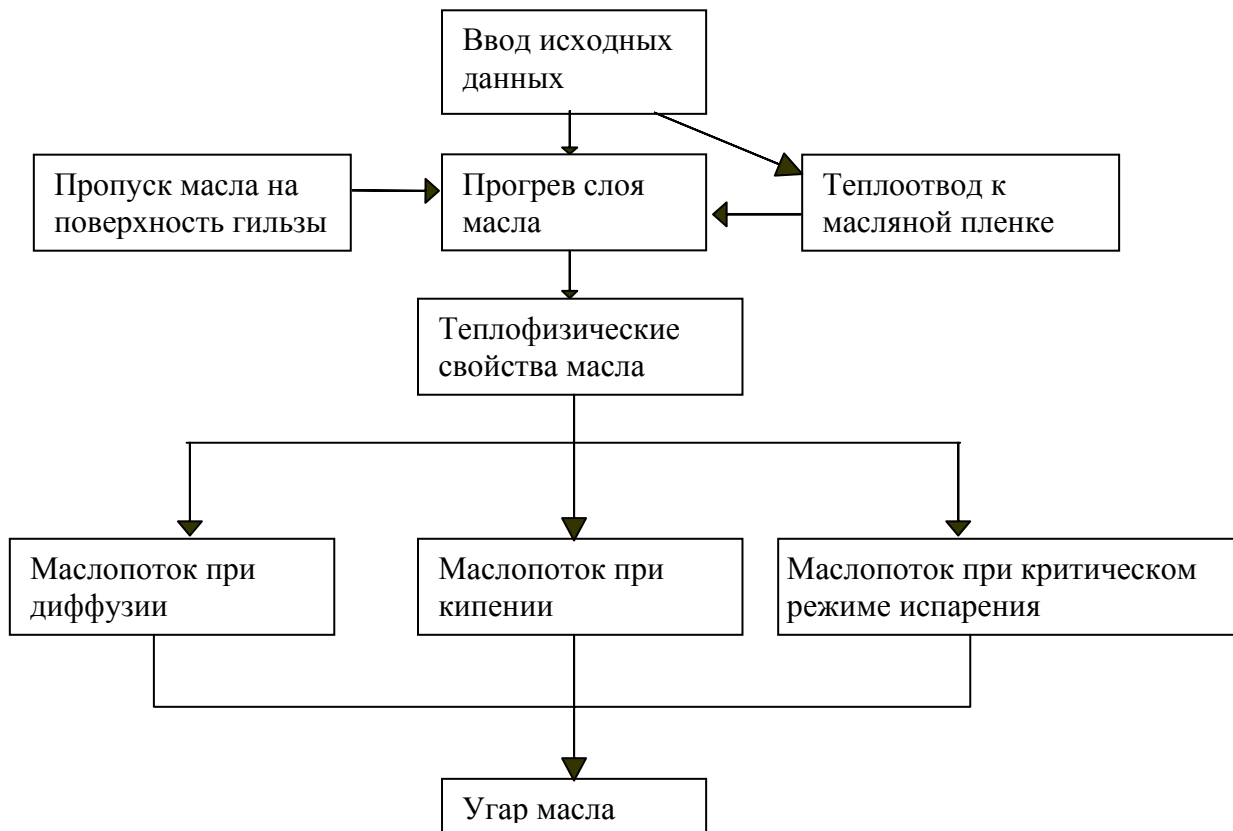


Рис.6 Упрощенная блок-схема расчета угара масла в ДВС.

5 Автоматизация испытаний ДВС

5.1 Структура и основные типы измерительно-вычислительных комплексов

Испытание такой СТС, как современный двигатель внутреннего сгорания, связано, как правило, с одновременной регистрацией многих параметров. Не менее трудоемкой задачей является последующая обработка результатов измерений. Указанные обстоятельства предопределили необходимость автоматизации испытаний ДВС

Типовая измерительная система как минимум включает:

- чувствительный элемент
- преобразователи сигнала
- усилитель
- устройство отображения.

В настоящее время вместо устройства отображения используется микропроцессорная техника. Микропроцессорные системы служат для исключения человека из процесса обработки сигналов, так как они могут снимать показания одновременно с нескольких датчиков или проводить опрос одного датчика заданное количество раз, обрабатывать принятые значения и выдавать полученное значение измеряемой величины прямо на выход системы.

В девяностых годах прошлого века, когда началось массовое внедрение малогабаритных ПК, на их базе были разработаны измерительно-вычислительные комплексы (ИВК) для проведения натурных испытаний дизельных установок.

Принципиальная структурная схема ИВК приведена на рис. 7.

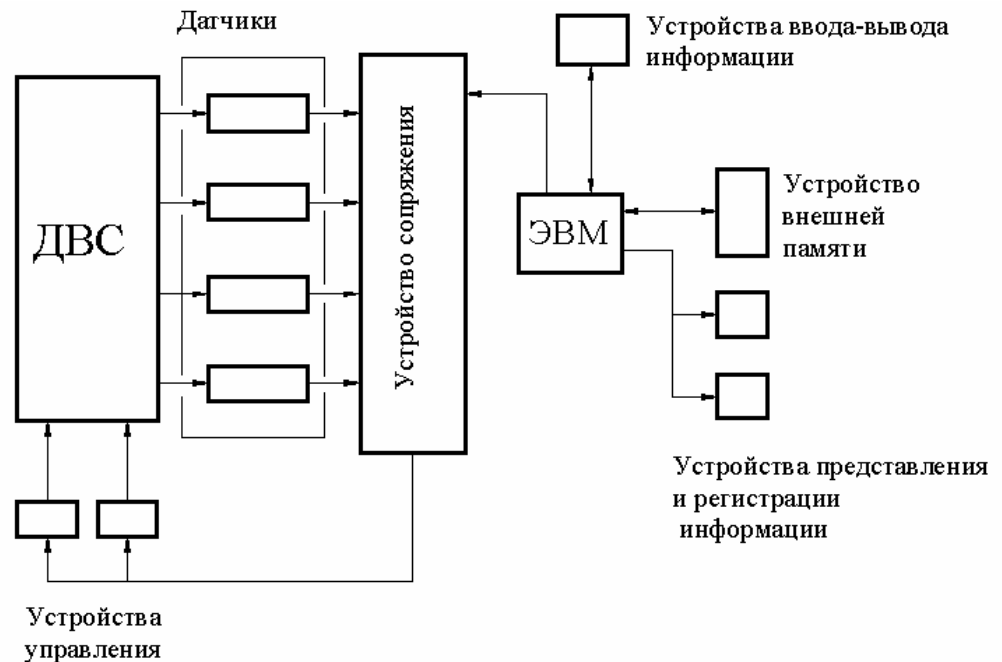


Рис.7 Принципиальная структурная схема ИВК

Для использования ЭВМ в автоматизированных измерительных системах необходимо иметь устройство сопряжения, преобразующее аналоговые сигналы, поступающие по измерительному каналу, в цифровой формат.

По типу применяемых устройств сопряжения ИВК делятся на два типа:

- ИВК с устройством сопряжения (интерфейс) в стандартах КАМАК. (САМАС – наименование стандарта и стандартного устройства сопряжения, разработанного под эгидой Европейского комитета по стандартизации в ядерной электронике);
- ИВК с машинным интерфейсом и использованием унифицированных функциональных узлов.

Для целей испытаний ДВС ИВК первого типа получили наибольшее распространение, поскольку в их составе можно использовать стандартную ПЭВМ и иметь переменный состав датчиков без изменения узлов ИВК.

ИВК второго типа стали повсеместно использоваться в локальных автоматизированных измерительных системах, где из-за массового производства экономически целесообразно наладить выпуск специализированных ЭВМ со стандартными комплектами измерительной аппаратуры. Примером такого ИВК является тепловычислитель для узла учета тепловой энергии.

Устройство сопряжения в стандартах КАМАК разработано на основе крейта. Крейт КАМАК – монтажный блок или каркас для установки вставных блоков, выполняющих различные функции. Крейт КАМАК включает в себя следующие позиции:

1. Магистраль крейта – оптопроводная сборка на задней панели крейта КАМАК, которая:
 - соединяет станции;
 - служит средством сообщения между вставными блоками в крейте КАМАК;

- обеспечивает питанием вставные блоки через шины питания, являющиеся частью магистрали крейта.
 2. Нормальная станция – одна из установочных позиций для вставных блоков в крейте КАМАК, обеспечивающая доступ к магистралям крейта. Линия доступа к магистралям крейта включает линии чтение и запись, а также две индивидуальные линии, которые соединяются с управляющей станцией. Одна из индивидуальных линий – для адреса станции (номер станции), другая для запросов (запрос на внимание).
 3. Управляющая станция – единственная установочная позиция в крейте КАМАК, предназначенная для крейт-контроллера и обеспечивающая доступ ко всем станциям по линиям номер станции, запрос на внимание.

5.1.2 Погрешность аналого-цифрового преобразователя.

При аналого-цифровом преобразовании (АЦП) входной сигнал связан с выходным следующей зависимостью:

$$V_A = V_R(b_1 2^{-1} + b_2 2^{-2} + b_3 2^{-3} \dots + b_n 2^{-n}),$$

где V_A – напряжение на аналоговом входе, V_R – опорное напряжение, b_1, b_2, \dots, b_n – цифровые выходы, n – число таких выходов. Все эти выходы вместе и составляют двоичное слово, соответствующее величине аналогового сигнала. Как видно из приведенного уравнения, выходной сигнал растет ступенчато. На рис.5.1 показано, как соотносятся аналоговое и отцифрованное напряжение.

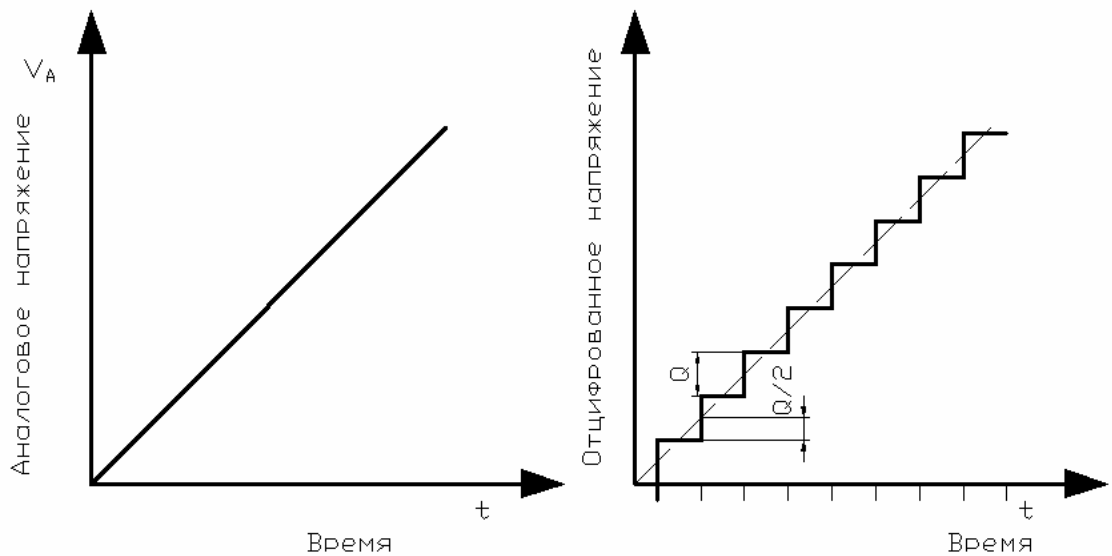


Рис.5.1

Термин квантование используется для обозначения преобразования непрерывного аналогового сигнала в ступенчатый дискретный выходной сигнал. Каждая ступенька (или уровень напряжения) такого выходного сигнала называется уровнем квантования. Интервал квантования – это разность уровней напряжения между двумя соседними ступеньками. Интервал квантования равен выходному сигналу, создаваемому младшим значащим битом двоичного входного слова. Так как квантованный сигнал может меняться только ступенчато, возникает погрешность АЦП, равная $\pm Q/2$.

5.2 Основные характеристики ИВК «Дизель»

Характерным примером первого типа ИВК является разработанный в судостроении мобильный комплекс «Дизель», предназначенный для испытаний дизелей на стендах и проведения натуральных испытаний дизельных установок на судах.

Состав ИВК «Дизель»:

- ПЭВМ IBM PC/AT
- Монитор
- Клавиатура (устройство ввода)
- Печатающее устройство (устройство вывода)
- Устройство сетевой развязки
- Нормирующие преобразователи (устройство унификации аналоговых сигналов до уровня 0-5 В)
- Два устройства NVL 07 (коммутатор каналов и аналого-цифровой преобразователь (АЦП))
- Комплект датчиков
- Соединительные кабели.

Сопрягающее устройство NVL 07 имеет 16 однопроводных каналов входа аналоговых сигналов и 8 входных линий цифрового ввода. Один из цифровых каналов используется для подачи сигнала отметчика ВМТ. Время преобразования

АЦП не более 30 мкс, время установления коммутатора каналов – не более 0,3 мкс, что позволяет без ощутимой погрешности считать опрос датчиков одновременным.

В качестве накопителей информации используется жесткий диск ЭВМ и дискеты.

Программное обеспечение ИВК реализует функционирование системы в следующих режимах:

- ввод исходных данных,
- контрольный опрос
- индицирование дизеля
- статика
- динамика
- вторичная обработка результатов измерений.

В режиме «Ввод исходных данных» задаются характеристики испытываемого объекта, условия испытаний, номера опрашиваемых датчиков, каналов, тарифовочные коэффициенты и параметры ввода измерительной информации.

В режиме «Контрольный опрос» осуществляется проверка и настройка всех измерительных трактов.

В режиме «Индицирование дизеля» выполняется снятие индикаторной диаграммы и определение следующих параметров:

- среднее индикаторное давление
- индикаторная мощность
- максимальное давление газов в цилиндре P_z
- угол поворота коленчатого вала, соответствующий P_z
- давление в ВМТ.

Режим «Статика» предназначен для определения параметров испытываемого объекта при многократном опросе датчиков. Выполнение одного цикла измерения по всем датчикам составляет точку наблюдения.

Режим «Динамика» предназначен для регистрации переходных процессов в энергетических установках синхронно по нескольким параметрам.

В режиме « Вторичная обработка результатов измерений» определяется значение мощности двигателя по косвенным показателям.

5.3 Программа автоматизированных испытаний

Программа испытаний ДВС в обязательном порядке должна содержать следующую информацию:

- цель испытаний
- состав экспериментальной установки
- режимы работы двигателя и их продолжительность
- перечень применяемых горюче-смазочных материалов
- метрологическое обеспечение
- методику обработки результатов экспериментов
- состав и форму представления документации по результатам

испытаний.

Целью испытаний может быть:

- исследование, проводимое с целью уточнения математической модели, используемой в САПР;
- доводка опытного образца ДВС до требуемого уровня показателей;
- сдаточные испытания на соответствие образца заявленным характеристикам;
- исследование поведения ДВС в составе энергетической установки под воздействием внешних факторов, которое нет возможности воспроизвести в стендовых условиях.

В разделе метрологическое обеспечение приводится состав датчиков, место и условия установки, диапазон измерения, погрешность измерения, при наличии преобразователя сигнала – тип преобразователя..

Программное обеспечение, вводимое в компьютер, зависит от цели испытаний, объекта испытаний и состава датчиков. Корректировка программного обеспечения производится на основании программы испытаний.

Приложение 1

3.2.1 Схема и порядок расчетов характеристик турбопоршневого двигателя

Расчет производится в следующем порядке:

- На основании исходных данных определяются параметры ТПД, принятые постоянными во всем диапазоне нагрузок и необходимые для расчета характеристик двигателя (в частности, рассчитываются константы, определяющие гидравлическую характеристику двигателя и эквивалентное проходное сечение турбины). Условно этот расчет назван расчетом номинального режима.
- В относительном виде рассчитывают характеристики (все значения вычисляются параметров как отношение текущего значения к значению на номинальной нагрузке).

Для упрощения расчетов без заметного снижения их точности приняты постоянными следующие величины:

- показатели адиабаты сжатия воздуха в компрессоре и расширения газов в турбине;
- газовая постоянная для воздуха и выпускных газов;
- коэффициенты аэродинамического сопротивления на всасывании компрессора, в холодильнике наддувочного воздуха (ХНВ) и в выпускном тракте.

3.2.2 Исходные данные для расчета

В качестве исходных данных задаются следующие параметры номинального режима:

$\pi_{кн}$ – степень повышения давления в компрессоре;

$\eta_{t\text{ хнв}}$ - термический к.п.д. ХНВ;

$\varphi_{пр н}$ - коэффициент продувки;

$\alpha_{\Sigma н}$ - суммарный коэффициент избытка воздуха;

$q_{охл н}$ - доля теплоты отводимой в охлаждающую среду в цилиндре двигателя;

$\eta_{I н}$ - индикаторный к.п.д. двигателя;

$\Delta P_{0 н}$ - потеря давления на всасывании компрессора, кг/см², (Мпа);

$\Delta P_{жнв н}$ - сопротивление ХНВ по наддувочному воздуху, кг/см², (Мпа);

$\Delta P_{2 н}$ - противодавление на выхлопе двигателя, кг/см², (Мпа).

Параметры окружающей среды:

P_0 - давление на входе в двигатель, кг/см², (Мпа);

T_0 - температура воздуха на входе в двигатель, °К;

T_w - температура воды на входе в ОНВ, °К.

Теплота сгорания топлива:

Q_n^P – ккал/кг (кдж/кг)

Наиболее простым является расчет нагрузочной характеристики двигателя, при котором можно принять постоянными следующие параметры:

λ - степень повышения давления при сгорании;

$\psi_{нсг}$ – доля тепловых потерь от неполноты сгорания топлива;

\overline{N}_{M, K_M} - коэффициенты для задания зависимости механического к.п.д. от нагрузки;

η_k – к.п.д. компрессора;

η_v - коэффициент наполнения;

$q_{охл т}$ – доля теплоты, отводимой в охлаждающую среду от корпуса ГТН;

A_0, A_1 - коэффициенты для предварительного задания зависимости

$\pi_k = f(N_e)$;

B_0, B_1 - коэффициенты для предварительного задания зависимости

$$P_{\Gamma} / P_{\kappa} = f(\overline{N_e});$$

κ_0 – показатель адиабаты сжатия воздуха;

κ_{Γ} – показатель адиабаты расширения выпускных газов;

R – газовая постоянная для воздуха и выпускных газов, ккал/кг $^{\circ}$ К (кДж/кг $^{\circ}$ К).

Зависимости, задаваемые в табличном виде или в виде функций:

$C_{pB} = f(T)$ – зависимость теплоемкости от температуры, ккал/кг $^{\circ}$ К (кДж/кг $^{\circ}$ К);

$K_N = f(\pi_{\kappa}, \pi_{\Gamma})$ – зависимость увеличения мощности турбины в импульсном потоке от степени повышения давления в компрессоре и от степени расширения газов в турбине.

В частности:

задание $C_{pB} = f(T)$

$$\begin{aligned} C_{pB}(T) = & 1.023 + .1156 * 1.E-4 * (T-273.) + .1972 * 1.E-6 * (T-273.) \\ & * **2 - .1665 * 1.E-9 * (T-273.) **3 + .5751 * 1.E-13 * (T-273.) **4 \\ & * -.7342 * 1.E-17 * (T-273.) **5 \end{aligned} \quad \text{кДж/кг}^{\circ}\text{К};$$

задание K_N в виде двумерного массива

DIMENSION X(5), Y(16), F(5,16)

DATA X/1.2,1.3,1.5,2.,2.8/,

\$ Y/1.1,1.15,1.2,1.25,1.3,1.35,1.40,1.45,1.5,1.6,1.7,

\$ 1.8,2.,2.2,2.4,2.6/

DATA F/1.375,1.26,1.215,1.157,1.132,1.29,1.212,1.175,1.135,

\$ 1.12,1.25,1.185,1.15,1.12,1.094,1.22,1.16,1.132,1.105,

\$ 1.082,1.195,1.142,1.117,1.092,1.07,1.17,1.125,1.105,

\$ 1.08,1.06,1.152,1.112,1.095,1.071,1.052,1.136,1.104,

\$ 1.084,1.062,1.043,1.124,1.096,1.075,1.055,1.035,1.11,

\$ 1.82,1.064,1.045,1.024,1.096,1.07,1.055,1.036,1.018,

\$ 1.086,1.062,1.048,1.03,1.012,1.074,1.05,1.037,1.024,

\$ 1.007,1.068,1.046,1.032,1.022,1.005,1.068,1.042,1.032,

\$ 1.02,1.002,1.068,1.042,1.032,1.02,1./

где X – значения π_{κ} , Y – значения π_{Γ} , F – значения K_N

3.2.3 Расчет номинального режима

Давление воздуха за компрессором:

$$P'_{\kappa H} = (P_0 - \Delta P_{0H}) \cdot \pi_{\kappa H} \quad \text{кг/см}^2 \text{ (Мпа)} \quad (6)$$

Температура воздуха за компрессором:

$$T'_{\kappa H} = T_0 \cdot \left(1 + \frac{\pi_{\kappa H}^{\frac{\kappa_0-1}{\kappa_0}} - 1}{\eta_{\kappa}}\right) \quad ^{\circ}\text{К} \quad (7)$$

Температура воздуха за ХНВ:

$$T_{\kappa H} = T'_{\kappa H} - \eta_{\Gamma \text{ ХНВ}} \cdot (T'_{\kappa H} - T_w) \quad ^{\circ}\text{К} \quad (8)$$

Расчетная температура воздуха в ХНВ:

$$T_{\text{ХРН}} = 0,5 \cdot (T'_{\kappa H} + T_{\kappa H}) \quad ^{\circ}\text{К} \quad (9)$$

Давление воздуха за ХНВ:

$$P_{\kappa H} = P'_{\kappa H} - \Delta P_{\text{ХНВ}} \quad \text{кг/см}^2 \text{ (Мпа)} \quad (10)$$

Давление газов перед турбиной:

$$P_{ГН} = P_{кн} \cdot (B_0 + B_1) \text{ кг/см}^2 \text{ (Мпа)} \quad (11)$$

Коэффициент, характеризующий время-сечение продувки:

$$K_{пр} = \frac{\Phi_{пр} - 1}{\sqrt{2g \cdot \frac{K_B}{K_B - 1} \left[\left(\frac{P_{ГН}}{P_{кн}} \right)^{\frac{2}{K_B}} - \left(\frac{P_{ГН}}{P_{кн}} \right)^{\frac{K_B - 1}{K_B}} \right] \cdot T_{кн}}} \quad (12)$$

Механический к.п.д. двигателя:

$$\eta_{мн} = \frac{1}{\bar{N}_M + (K_M + 1) \cdot \bar{N}_e} \quad (13)$$

Теплоемкость выпускных газов при температуре T:

$$c_{pГТ} = \frac{0,24052 + 0,3516 \cdot 10^{-4} \cdot T + (\alpha_{\Sigma H} - 1) \cdot c_{pBT}}{\alpha_{\Sigma H}} \text{ ккал/кг} \cdot ^\circ\text{К} \text{ (кДж/кг} \cdot ^\circ\text{К)} \quad (14)$$

Температура выпускных газов перед турбиной:

$$T_{ТН} = \frac{L_0 \cdot T_{кн} \cdot c_{pBTкн} \cdot \alpha_{\Sigma H} + Q_H^P \cdot (1 - \eta_{ин} - q_{охлн} - \Psi_{нсг})}{c_{pГТТН} \cdot (L_0 \cdot \alpha_{\Sigma H} + 1)} \text{ } ^\circ\text{К} \quad (15)$$

где L_0 – количество воздуха, теоретически необходимое для сгорания 1 кг топлива; для топлива среднего состава $L_0 = 14,33$ кг.

Система уравнений 14 –15 решается методом итераций.

Давление газов за турбиной:

$$P_{2н} = P_0 + \Delta P_{2н} \text{ кг/см}^2 \text{ (Мпа)} \quad (16)$$

Функция расхода газа через турбину:

$$\Psi_{ГН} = \sqrt{2g \frac{K_T}{K_T - 1} \left[\left(\frac{P_{2н}}{P_{ГН}} \right)^{\frac{2}{K_T}} - \left(\frac{P_{2н}}{P_{ГН}} \right)^{\frac{K_T + 1}{K_T}} \right]} \quad (17)$$

где $K_T = 1,34$ – показатель адиабаты расширения газов в турбине.

Если $P_{2н} / P_{ГН} < 0,537$ $\Psi_{ГН} = 2,1178$.

Удельный расход топлива:

$$g_{ен} = \frac{632,3}{\eta_{ин} \cdot \eta_{мн} \cdot Q_H^P} \text{ кг/л.с.ч, где } Q_H^P \text{ -в ккал/кг} \quad (18)$$

$$g_{\text{ен}} = \frac{3600}{\eta_{\text{ин}} \cdot \eta_{\text{мн}} \cdot Q_{\text{н}}^{\text{р}}} \text{ кг/кВт ч, где } Q_{\text{н}}^{\text{р}} \text{ - в кДж/кг}$$

Удельный расход газа:

$$g_{\text{гн}} = g_{\text{ен}} \cdot (L_0 \cdot \alpha_{\Sigma\text{н}} + 1) \text{ кг/л.с.ч (кг/кВт ч)} \quad (19)$$

Степень расширения газов в турбине:

$$\pi_{\text{тн}} = \frac{P_{\text{гн}}}{P_{2\text{н}}} \quad (20)$$

Характеристика эквивалентного пропускного сечения турбины:

$$F(\mu_{\text{TFC}})_{\text{н}} = \frac{\sqrt{RT_{\text{тн}}}}{P_{\text{гн}} \cdot \Psi_{\text{гн}}} \quad (21)$$

Коэффициент увеличения мощности турбины при импульсной системе наддува:

$$K_{\text{Нн}} = f(\pi_{\text{кн}}, \pi_{\text{тн}}) \quad (22)$$

Коэффициент полезного действия турбины:

$$\eta_{\text{т}} = \frac{K_{\text{г}} - 1}{K_{\text{г}}} \cdot \frac{K_{\text{в}}}{K_{\text{в}} - 1} \cdot \frac{T_0 (\pi_{\text{кн}}^{K_{\text{в}}} - 1)}{T_{\text{тн}} \left(1 - \frac{1}{\pi_{\text{т}}^{K_{\text{г}}}}\right) \cdot K_{\text{Нн}} \cdot \eta_{\text{к}}} \quad (23)$$

Температура выпускных газов за турбиной без учета охлаждения:

$$T_{2\text{н}} = T_{\text{тн}} \left[1 - \left(1 - \frac{1}{\pi_{\text{т}}^{K_{\text{г}}}}\right) \cdot \eta_{\text{т}}\right] \text{ } ^\circ\text{К} \quad (24)$$

Температура выпускных газов за турбиной с учетом охлаждения:

$$\Theta_{\text{н}} = \frac{(L_0 \cdot \alpha_{\Sigma\text{н}} + 1) \cdot T_{2\text{н}} \cdot c_{\text{PгT}_{2\text{н}}} - Q_{\text{п}}^{\text{н}} \cdot q_{\text{охлT}}}{(L_0 \cdot \alpha_{\Sigma\text{н}} + 1) \cdot c_{\text{Pг}\Theta_{\text{н}}}} \text{ } ^\circ\text{К}, \quad (25)$$

где значения $c_{\text{PгT}_{2\text{н}}}$ и $c_{\text{Pг}\Theta_{\text{н}}}$ вычисляются по формуле (14). Значения $c_{\text{Pг}\Theta_{\text{н}}}$ и $\Theta_{\text{н}}$ находятся методом итераций.

3.2.4 Расчет нагрузочной характеристики двигателя

Нагрузочная характеристика рассчитывается в виде относительных величин (в последующих формулах они имеют черту над обозначением). Учитывая, что расчет параметров производится методом последовательных приближений, в его начале предварительно задаются зависимости: $\bar{\pi}_{\text{к}} = f(\bar{N}_{\text{е}})$ и $P_{\text{г}} / P_{\text{к}} = f(\bar{N}_{\text{е}})$. В процессе

расчета значения $\bar{\pi}_k$ и P_r/P_k уточняются. Нагрузочная характеристика вычисляется в диапазоне мощностей $\bar{N}_e = (1 \div 0,3)$.

Предварительное задание степени повышения давления в компрессоре:

$$\bar{\pi}_k = A_0 + A_1 \cdot \bar{N}_e \quad (26)$$

Предварительное значение давления воздуха на всасывании компрессора, если в первом приближении принять расход воздуха пропорциональным степени повышения давления в компрессоре:

$$P_{вс} = P_0 - \Delta P_{0H} \cdot \bar{\pi}_k^2 \quad \text{кг/см}^2 \text{ (МПа)} \quad (27)$$

В следующем цикле приближений $P_{вс}$ рассчитывается по формуле:

$$P_{вс} = P_0 - \Delta P_{0H} \cdot \bar{G}_{дв}^2 \quad \text{кг/см}^2 \text{ (МПа)} \quad (28)$$

Степень повышения давления в компрессоре:

$$\pi_k = \bar{\pi}_k \cdot \pi_{кн} \quad (29)$$

В дальнейшем π_k уточняется на основании уравнения равенства мощностей турбины и компрессора.

Давление воздуха за компрессором:

$$P'_k = \pi_k \cdot P_{вс} \quad \text{кг/см}^2 \text{ (МПа)} \quad (30)$$

Температура воздуха за компрессором:

$$T'_k = T_0 \left(\frac{\pi_k^{\frac{K_B-1}{K_B}} - 1}{\eta_k} + 1 \right) \quad \text{°К} \quad (31)$$

Температура воздуха за ХНВ:

$$T_k = T'_k - \eta_{ТХНВ} (T'_k - T_w) \quad \text{°К} \quad (32)$$

Расчетная температура воздуха в ХНВ:

$$T_{ХНВр} = 0,5(T'_k + T_k) \quad \text{°К} \quad (33)$$

Относительный расход воздуха через двигатель в первом приближении определяется из условия равенства $\varphi_{пр} = \varphi_{прн}$ и сохранения постоянной пропорциональности между π_k и давлением воздуха за ХНВ:

$$\bar{G}_{дв} = \bar{\pi}_k \cdot \frac{T_{кн}}{T_k} \quad (34)$$

Давление воздуха за ХНВ вычисляется из условия постоянства коэффициента аэродинамического сопротивления ХНВ и считая, что расчетное давление в ХНВ пропорционально π_k :

$$P_k = P'_k - \Delta P_{\text{ХНВН}} \cdot \frac{\bar{G}_{\text{дв}}^2 \cdot T_{\text{ХНВР}}}{\bar{\pi}_k \cdot T_{\text{ХНВРН}}} \text{ кг/см}^2 \text{ (МПа)} \quad (35)$$

Предварительное задание P_Γ/P_k :

$$P_\Gamma/P_k = B_0 + B_1 \cdot \bar{N}_e \quad (36)$$

Предварительное значение давления газов перед турбиной:

$$P_\Gamma = P_k \cdot P_\Gamma/P_k \text{ кг/см}^2 \text{ (МПа)} \quad (37)$$

Функция расхода при продувке:

$$\text{а) } \Psi_{\text{пр}} = 0, \text{ если } P_\Gamma/P_k \geq 1$$

$$\text{б) } \Psi_{\text{пр}} = \sqrt{2g \frac{K_B}{K_B - 1} \left[\left(P_\Gamma / P_k \right)^{\frac{2}{K_B}} - \left(P_\Gamma / P_k \right)^{\frac{K_B + 1}{K_B}} \right]} \quad (38)$$

Коэффициент продувки:

$$\Phi_{\text{пр}} = 1 + \frac{K_{\text{пр}}}{\eta_v} \cdot \Psi_{\text{пр}} \sqrt{T_k} \quad (39)$$

Относительный расход воздуха через двигатель во втором приближении:

$$\bar{G}_{\text{дв}} = \frac{\Phi_{\text{пр}} \cdot P_k \cdot T_{\text{кН}}}{\Phi_{\text{прН}} \cdot P_{\text{кН}} \cdot T_k} \quad (40)$$

Если значения $\bar{G}_{\text{дв}}$, вычисленные по формулам (34) и (40) отличаются менее, чем на 0,15%, расчет продолжается. Если это условие не выполняется, среднее значение $\bar{G}_{\text{дв}}$ подставляется в формулу (34) и расчет повторяется до получения сходимости с заданной точностью. В случае закливания программы меняется порядок приближения к заданному значению.

Механический к.п.д. двигателя:

$$\eta_M = \frac{\bar{N}_e}{\bar{N}_M + \bar{N}_e \cdot (K_M + 1)} \quad (41)$$

Относительный индикаторный к.п.д. двигателя:

$$\bar{\eta}_i = \left[\frac{\frac{1,3 - 0,08(3 - \alpha_{\text{дн}} \cdot \bar{\alpha}_d)}{\alpha_{\text{дн}} \cdot \bar{\alpha}_d}}{\frac{1,3 - 0,08(3 - \alpha_{\text{дн}})}{\alpha_{\text{дн}}}} \right]^{\frac{1}{\lambda}} \quad (42)$$

Относительное значение действительного коэффициента избытка воздуха для сгорания:

$$\bar{\alpha}_d = \frac{\bar{G}_{дв} \cdot \eta_m \cdot \bar{\eta}_i \cdot \Phi_{прН}}{\bar{N}_e \cdot \eta_{мн} \cdot \Phi_{пр}} \quad (43)$$

При решении уравнений (42) и (43) в программе образуется цикл, в котором значения $\bar{\eta}_i$ и $\bar{\alpha}_d$ определяются методом последовательных приближений до получения сходимости с заданной точностью.

Суммарный коэффициент избытка воздуха:

$$\alpha_\Sigma = \bar{\alpha}_d \frac{\Phi_{пр}}{\Phi_{прН}} \cdot \alpha_{\SigmaН} \quad (44)$$

Доля теплоты, отводимой в охлаждающую среду в цилиндре двигателя:

$$q_{охл} = q_{охлН} \cdot \left(\frac{T_k}{T_{кН}} \right) \cdot \left(\frac{P_{кН}}{P_k} \right)^{0,434} \quad (45)$$

Индикаторный к.п.д.:

$$\eta_i = \eta_{ин} \cdot \bar{\eta}_i \quad (46)$$

Теплоемкость выпускных газов:

$$c_{pГТ} = \frac{0,24052 + 0,3516 \cdot 10^{-4} \cdot T + (\alpha_\Sigma - 1) \cdot c_{pВТ}}{\alpha_\Sigma} \quad \text{ккал/кг} \cdot \text{°К} \quad (\text{кДж/кг} \cdot \text{°К}) \quad (47)$$

Температура газов перед турбиной:

$$T_T = \frac{L_0 \cdot T_k \cdot c_{pВТк} \cdot \alpha_\Sigma + Q_p^H \cdot (1 - \eta_i - q_{охл} - \Psi_{нсг})}{c_{pГТ} \cdot (L_0 \cdot \alpha_\Sigma + 1)} \quad \text{°К} \quad (48)$$

Система уравнений (45) – (46) решается методом итераций.

Предварительное значение давления газов за турбиной:

$$P_2 = P_0 + \Delta P_{2Н} \cdot \frac{\bar{G}_{дв} \cdot T_T}{T_{тН}} \quad \text{кг/см}^2 \quad (\text{МПа}) \quad (49)$$

Функция расхода газа через турбину:

$$\Psi_T = \sqrt{2g \frac{K_T}{K_T - 1} \left[\left(\frac{P_2}{P_T} \right)_{K_T}^2 - \left(\frac{P_2}{P_T} \right)_{K_T}^{K_T+1} \right]} \quad (50)$$

$$\Psi_T = 2,1178 \quad \text{если} \quad P_2 / P_T \leq 0,537$$

Относительная величина удельного эффективного расхода топлива:

$$\bar{g}_e = \frac{\eta_{MH}}{\eta_M \cdot \bar{\eta}_i} \quad (51)$$

Удельный расход топлива:

$$g_e = g_{eH} \cdot \bar{g}_e \quad \text{кг/кВт ч}, \quad (52)$$

Удельный расход газа:

$$g_r = g_e \cdot (L_0 \cdot \alpha_\Sigma + 1) \quad \text{кг/кВт ч}, \quad (53)$$

Относительный расход газа через двигатель:

$$\bar{G}_r = \frac{g_r}{g_{rH}} \cdot \bar{N}_e \quad (54)$$

Степень расширения газов в турбине:

$$\pi_T = \frac{P_r}{P_2} \quad (55)$$

Характеристика эквивалентного пропускного сечения турбины:

$$F(\mu_T F_C) = F(\mu_T F_C)_H \cdot (0,8 + 0,2 \cdot \frac{\pi_T}{\pi_{TH}}) \quad (56)$$

Давление газов перед турбиной:

$$P_r = \frac{\bar{G}_r \sqrt{RT_r}}{F(\mu_T F_C) \cdot \psi_r} \quad \text{кг/см}^2 \text{ (Мпа)} \quad (57)$$

Полученное по формуле (55) значение сравнивается с величиной P_r , полученной по формуле (36) и, если они различаются менее чем на 0,15%, расчет продолжается. В противном случае откорректированное значение P_r подставляется в формулу (36) и расчет повторяется до получения сходимости с заданной точностью.

Коэффициент увеличения мощности турбины в импульсном потоке:

$$K_N = f(\pi_k, \pi_t) \text{ - задан в виде функции двух переменных для импульсного наддува} \quad (58)$$

$K_N = 1$ – для систем наддува при постоянном давлении

$K_N = 0,5(f(\pi_k, \pi_t)+1)$ – для систем наддува с преобразователями импульсов

Относительная работа компрессора:

$$\bar{L}_k = \frac{\pi_k^{\frac{K_B-1}{K_B}} - 1}{\pi_{kH}^{\frac{K_B-1}{K_B}} - 1} \quad (59)$$

Относительная частота вращения турбокомпрессора:

$$\bar{p}_{TK} = \sqrt{\bar{L}_K} \quad (60)$$

Относительный коэффициент напора турбины:

$$\bar{h}_T = \frac{(1 - \pi_T \frac{1-K_T}{K_T}) \cdot T_T}{(1 - \pi_{TH} \frac{1-K_T}{K_T}) \cdot T_T \cdot \bar{L}_K} \quad (61)$$

Относительный к.п.д. турбины:

$$\bar{\eta}_T = f(\bar{h}_T) - \text{функция, заданная таблично} \quad (62)$$

К.п.д. турбины:

$$\eta_T = \bar{\eta}_T \cdot \eta_{TH} \quad (63)$$

Степень повышения давления в компрессоре:

$$\pi_K = \left[\frac{(1 - \pi_T \frac{1-K_T}{K_T}) \cdot T_T \cdot \kappa_N \cdot \eta_T \cdot \eta_K}{T_0 \cdot \frac{\kappa_T - 1}{K_T} \cdot \frac{\kappa_B}{\kappa_B - 1}} + 1 \right]^{\frac{\kappa_B}{\kappa_B - 1}} \quad (64)$$

Полученное значение π_K сравнивается с величиной, принятой предварительно по формуле (26). При отсутствии сходимости с заданной точностью значение π_K в формуле (26) корректируется и расчет повторяется до получения требуемой сходимости.

Температура газов за турбиной без учета охлаждения:

$$T_2 = T_T \left[1 - \frac{1}{\pi_T^{\frac{1}{\kappa_T - 1}}} \cdot \eta_T \right] \text{ °K} \quad (65)$$

Температура газов за турбиной с учетом охлаждения:

$$\Theta = \frac{(L_0 \cdot \alpha_\Sigma + 1) \cdot T_2 \cdot c_{pT_2} - Q_p^H \cdot q_{охлT}}{(L_0 \cdot \alpha_\Sigma + 1) \cdot c_{p\Theta}} \text{ °K} \quad (66)$$

где значения c_{pT_2} и $c_{p\Theta}$ вычисляются по формуле (14). Значения $c_{p\Theta}$ и Θ находятся методом итераций.

Список литературы

1. А.Ю. Шабанов, Методические основы построения систем автоматизированного проектирования двигателей внутреннего сгорания, Учебное пособие, ЛПИ, 1989г.
2. Петриченко, Батурин, Исаков и др., Элементы системы автоматизированного проектирования ДВС, Л., Машиностроение, 1990г.
3. М.И. Калинина, Регулирование охлаждения наддувочного воздуха как средство повышения теплоиспользования в судовых многорежимных дизельных установках, диссертация на звание к.т.н., Л., 1981г.
4. Измерительно- вычислительный комплекс «Дизель-3». Техническое описание и инструкция по эксплуатации, ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова
5. У. Болтон, Карманный справочник инженера-метролога, Издательский дом «Додэка-XXI»