

Рис.2. Зависимость энергетического критерия от геометрических параметров канала (u).

На рис.3 показаны газодинамические характеристики базового и улучшенного впускного канала.

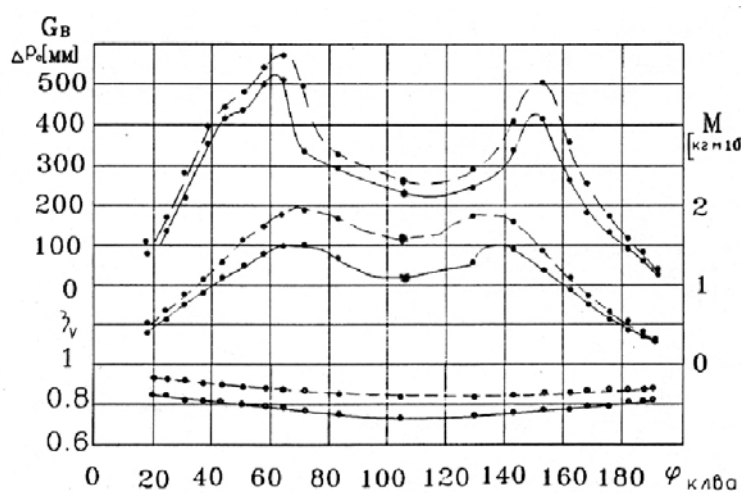


Рис. 3. Газодинамические характеристики базового (-----) и нового (—) впускного канала 8ч 12/12 и 8ч 12/12

Видно, что коэффициент расхода нового впускного канала на 15-20% выше чем у базового. Использование улучшенной формы впускного канала позволяет снизить расход топлива на 2-2,5% а дымность на 15-18%.

Аналогичные результаты были получены и для выпускного канала, хотя улучшение показателей двигателя несколько ниже.

Литература

1. Р.Ш Адамия, А.А. Манджавидзе. Основы рационального проектирования газозоудшного тракта дизеля. Тбилиси, Изд. "Мецниереба", 1993г. 164с.
2. Bim R., Worming P. Unexplicit factorized scheme of Navye-Stoks equation, for depressed gas flow. Reactive technique and astronautics - 1978 g.16. №4. p 154-156.
3. Covenca V., Ianenco N. Method of spitting in gas dynamics. Science. 1981. p. 309

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОЧЕГО ЦИКЛА И ГАЗООБМЕНА ДЛЯ УСКОРЕНИЯ РАЗРАБОТКИ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДВС

Киселёв Б.А. (ГНЦ РФ – ФГУП «НАМИ»)

Масштабность производства и автомобильного парка, многократное превышение их суммарной мощности таковой всех электростанций и расходование на их производство и эксплуатацию значительной части производимого металла, добываемой нефти, порождают проблемы по снижению вредных выбросов в атмосферу, расходованию металла, топлива, обуславливают актуальность ускорения разработки и совершенствования автомобильных ДВС. Их отрицательное воздействие на окружающую среду растёт (за 1990-2004 гг. выбросы отечественного автомобильного транспорта выросли на 20%). Это заставляет ужесточать экологические требования, обуславливающие рост затрат и трудностей в совершенствовании автомобильных ДВС, а они и так наиболее сложные и трудоёмкие для оптимизации технические объекты. Очистку ДВС от ОГ и наполнение его зарядом определя-

ют 10 параметров и необходим подбор их оптимального сочетания. Но и при трёх значениях каждого из них требуется $3 \cdot 10^7$ опытов. Теорией уменьшают их число, но и тогда их чрезмерно много. Так, фирма NSU по подбору параметров ГВТ одноцилиндрового гоночного двигателя провела 60 тыс. опытов.

В докладе приводятся методические основы ускоренной оптимизации показателей, схем и параметров газораспределения и ГВТ автомобильных ДВС; смешанная краевая задача систем уравнений в частных производных гиперболического типа о газообмене с учётом потоков в ГВТ; автоматизированная система НАМИ программ расчёта; оптимизация схем и параметров газораспределения и ГВТ автомобильных ДВС.

Настоящему состоянию проблемы предшествовало, начиная с В.И. Гриневецкого (1907г.), развитие способов расчёта рабочего цикла и газообмена без и с учётом течений в ГВТ ДВС балансовыми, инерционными, акустическо-резонансными методами. Начало расчётной оптимизации газораспределения и ГВТ ДВС положил Е.Дженни (1950 г.), разработавший одномерную модель течений в ГВТ ДВС и разностно-характеристический метод решения задачи. На их основе созданы комплексы программ рабочих процессов ДВС с учётом в ГВТ газо-, а в НАМИ (руководитель Б.А.Киселёв) и топливовоздушных потоков, ЦНИДИ (О.Г. Красовский), МВТУ (М.Г. Круглов), ЛМВУ (С.В. Камкин), УАИ (Б.П. Рудой), ХАИ (Д.А. Мунштуков), ХПИ (В.Г. Дьяченко); Г. Лист, Г. Рейл, Е. Дженни (Австрия); Р.С.Бенсон с сотрудниками (Англия); Е.Х.Райт, К.Ф. Гилл (США); Х. Зейферт, Х. Штромберг (ФРГ); Г. Феррари (Италия), которые ускоряли и снижали затраты за счёт выбора схем и параметров ещё при проектировании. Так, система VOOST фирмы AVL, демонстрировавшаяся на VI международной выставке НАМИ-ЭКСПО, позволила выбрать двухступенчатый турбонаддув с рециркуляцией ОГ.

Особенности, содержание и результаты работ автора и возглавляемого им коллектива: практическая направленность; ускоренная оптимизация показателей, схем и параметров газораспределения, ГВТ автомобильных ДВС всех типов; надёжность разработок, подтверждённая численно-физическими экспериментами; уменьшенное число и трудоёмкость подлежащих экспериментам вариантов. Средства обеспечения: системная разработка моделей, программ, систем расчёта и методики экспериментов; машинная генерация программ расчёта; численно-физические эксперименты; обобщённые параметры.

Постановка задачи, модели и программы расчёта совершенствовались. Но уже в первой программе 1966г. учитывалось влияние на рабочие процессы явлений в ГВТ использованием постоянных и переменных экспериментальных значений давлений и учётом прямых и обратных направлений течений в клапанах. А в первой общей задаче газообмен рассматривался как совокупность опорожнения цилиндров от ОГ и наполнения их зарядом (задача о цилиндре) и потоков в ГВТ (задача о трубопроводе) и решалась методами последовательных приближений – раздельного (поэтапного) и сквозного (на каждом временном слое) счёта. Так поставленная задача представляла шаг вперёд. Поэтапный и сквозной счёт обеспечили сходимость решения задачи на 3-4 и 1-3 расчётных циклах. Допустимость линейной теории в расчётах ДВС рассмотрена на примере течений воздуха за поршнем в трубе адиабатического сжатия: он мгновенно приобретает скорость u , и в некоторый момент также мгновенно останавливается. Такой закон позволил определить максимальные отклонения параметров потока и только так задача решается аналитически. Подсчитанные по нелинейной и линейной теориям значения p , ρ при скоростях 50 и 100 м/с разнятся на +2,12, -1,18 и +10,05 и -4,65%, т.е.

при $u > 50$ м/с линейная теория – грубое приближение. Расчёты по ней подтвердили волновой характер изменения давления и скорости потока, сходимость решения на резонансных режимах введением в уравнение движения диссипативного члена и учёта потерь при прямом направлении потока в открытом конце тракта. Точность оставалась низкой и эксперименты сопоставлялись с расчётами по нелинейным моделям. Оценка задач о цилиндре и трубопроводе и моделей элементов ГВТ проведена на дизеле и карбюраторном двигателе.

Действующие на наполнение факторы делятся на две группы (Б.Р.Ибрагимов): начальные условия в цилиндре не влияют на точность определения показателей наполнения и могут задаваться приближенно; колебания давления во впускном тракте, теплообмен газов в цилиндре, эффективная площадь клапанных щелей, – от точности их задания зависят расчётные результаты. При учёте этого квазистационарная модель процессов в цилиндре обеспечивает соответствие результатов расчёта и эксперимента и включена в общую задачу о газообмене. Новым в её последней модификации (В.М. Фомченко) являются: аппроксимация тепловыделения зависимостями скорости выгорания топлива с одним и двумя максимумами; определение теплоотдачи к поверхностям рабочего объёма законами Ньютона и Стефана-Больцмана; испарение топлива в цилиндре рассматривается в предположении сферической формы капель; учёт утечек рабочего тела и изменения направления течения в клапанных щелях во всех фазах газообмена; расчётное определение впрыска и дозирования топлива и смесеобразования во впускной системе; учёт изменения состава рабочего тела отношениями теплоёмкостей.

Базовая модель течений в линейно протяжённых каналах – дисперсно-кольцевое топливовоздушной смеси паров и капель бензина в ядре несущего потока и топливной плёнкой на стенках канала (В.И. Ибрагимов, А.С. Семёнова). Рассматривается оно в рамках механики многофазных сред и представлении гетерогенной смеси как совокупности трёх взаимопроникающих континуумов в одном и том же объёме, в любой точке которого определены параметры каждой фазы. Принимается, что пары и паровоздушная смесь – калорически совершенные газы, топливная плёнка и капли несжимаемы и испаряются при равенстве энтальпий испаряющихся масс и пара в состоянии насыщения. При этих условиях, с использованием трудов Х.А. Рахматулина, Р.И. Нигматулина., получена исходная система уравнений гиперболического типа. Замыкающие соотношения силового и теплового взаимодействия фаз, фазовых переходов выбраны наиболее соответствующими потокам и смесеобразованию во впускном тракте бензиновых автомобильных ДВС.

Из течений гетерогенной топливовоздушной смеси в дозирующих системах карбюратора в рамках общей задачи о газообмене рассмотрены (А.Г. Кривошеев, А.Н. Помилуйко) модели течения гомогенной несжимаемой, сжимаемой и неоднородной двухскоростной смеси, дозирование топлива на режимах глубокого дросселирования и определены условия обеспечения практической точности расчётов по ним.

Конструктивные элементы разбивают ГВТ на протяжённые по длине участки, по отношению к газовоздушным потокам в них, выполняющими роль граничных элементов, процессы в которых описываются в квазистационарном приближении. Они разделяются на местные сопротивления, ёмкости, разветвления и турбины и компрессоры, аппроксимируемые расходными характеристиками.

Общая задача о газообмене формируется исходя из того, что схемы ДВС – совокупность линейно протяжённых участков трубопроводов и граничных элемен-

тов. Общей моделью процессов в ГВТ является такое число систем уравнений в частных производных, сколько в нём участков труб, а в граничных элементах - дифференциальные и алгебраические уравнения, выполняющие роль граничных условий систем уравнений в частных производных. Решается набор таких систем итерационным разностно-характеристическим методом. Это обеспечило переход от объектового программирования для каждого ДВС к системам машинной генерации программ расчёта, основанным на сотовой структуре прямоугольной сеточной области решения, кодировании схемы ГВТ, управляющей программе и библиотеке моделей. Для получения расчётной схемы двигатель заменяется плоской - с элементами ГВТ - символами: участки трубопроводов - отрезками прямых, а остальные - точками. Затем она приводится на базовую прямую: участки трубопроводов изображаются параллельными, а граничные элементы - перпендикулярными отрезками или точками на ней. В результате для каждой трубы определены правая и левая границы и возможность перехода к кодированию схемы. Её элементы нумеруются в произвольном порядке, им присваиваются порядковые номера - числа IN1, типу модели - IN2, а номерам граничных элементов левого и правого концов участков труб - IN3, IN4. Для граничных элементов кроме IN1 и IN2 дополнительной информации не требуется и она используется для оценки правильности кодирования схемы. Известные способы кодирования Райта и Бенсона сложнее нашего.

Модели процессов в протяженных и граничных элементах реализуются на базе структуры двухслойных элементов и узлов, обеспечивающих построение программы расчёта газообмена автомобильных ДВС с любой схемой ГВТ. Для этого отдельные модели управляющей программой связываются в единую программу расчёта. Из известных подходов (пакеты программ, программы расчёта обобщённой схемы, автоматизированные системы интерпретирующего типа) в 1975г. разработана (В.Н.Тупикин,..) наиболее совершенная автоматизированная система компилирующего типа расчёта рабочих процессов ДВС, в 1980 и 1985 гг. она модернизировалась. Её особенности следующие: отсутствие необходимости в дополнительном программировании, что делает её доступной потребителю результатов; разделение во времени генерации программ и расчётных исследований; состоит из библиотеки моделей, подсистем её обслуживания, генерации программ, управления расчётными исследованиями; выдача программ, инструкций по их эксплуатации и результатов расчётов в цифровой и графической формах; различные линейные и временные шаги для каждого линейно протяжённого участка ГВТ; возможность использования на различных ЭВМ; сокращение времени получения программ расчёта газообмена с многих месяцев при объектовом программировании до 1-2 ч., что позволило расширить фронт работ, ускорить и углубить численные эксперименты и рекомендации. В 1982 г. система внедрена на АвтоВАЗе, поставлена в UVMV (ЧСФР). Несмотря на рост быстродействия ЭВМ снижение объёма оптимизационных экспериментов по-прежнему актуально и нами применены обобщённые параметры, учитывающие характерные для ГВТ автомобильных ДВС конструктивные элементы. Корректные постановка и решение задачи, позволили найти практические решения проблемы газодинамического наддува для всех типов автомобильных ДВС.

Газодинамический наддув карбюраторных и двигателей с впрыском бензина ГАЗ-24 и ГАЗ-14.

Вместо серийной впускной системы ГАЗ-24 (V-6) рекомендована двухсекционная, одноузловая с патрубками одинаковой длины и тремя цилиндрами ряда в

каждой секции. Оптимизация длины и диаметра патрубков, общих участков, входного и участков разветвления обеспечила $\eta_v = 0,85-0,92-0,85$ (2000-3600-5000 мин⁻¹) при коэффициентах расхода входного участка и узла разветвления $\mu=0,7$ и диаметре общих участков 60 мм, что существенно выше диаметра смесительных камер карбюратора. Проблема решена разбиением впускного тракта на две части размещением между воздушным каналом карбюратора и впускным трубопроводом камеры, охватывающей входные патрубки с насадками с гладкими кромками, обеспечивающими эффективное преобразование двигающихся по ветвям трубопровода волн разрежения в волны давления. Камера позволяет выбирать параметры впускного тракта исходя из требований газодинамического наддува. Колебания скорости и давления и потери в карбюраторе уменьшаются. Гомогенность смеси обеспечивается соплами - продолжениями смесительных камер, входящими в патрубки трубопровода, образуя кольцевые каналы. При неизменных габаритах и остальных систем двигателя мощность и крутящий момент по скоростной характеристике возросли на 6,5-9 и 6%, удельный расход топлива снизился на 4-12%, и на 10-60% содержание СО и суммарная токсичность ОГ на 7-15%. При меньших сопротивлениях навесных элементов впускной системы и большей продолжительности открытия клапанов были дополнительно улучшены показатели двигателя ГАЗ-24-14. Этот подход был реализован и на 4,24 л двигателе V-8: мощность повышена на 6-8%, удельный расход топлива по скоростной характеристике снижен в среднем на 6%, а содержание СО – на 30-50%. Разработка защищена авторским свидетельством.

Газодинамический наддув бензиновых двигателей с впрыском бензина облегчен отсутствием жестких ограничений на сечение дроссельного участка. Расчётами обоснован переход от серийной более сложной и менее совершенной схемы впускной системы к одноресиверной, располагаемой в развале блока цилиндров. Обеспечение в двигателях ГАЗ-14, -24, -3101, ВАЗ-2103 с впрыском бензина $\eta_v = 0,9-1,0-0,8$ при 2000-3000-5000 мин⁻¹ зависит от величины коэффициента расхода входных участков впускных патрубков и воздушного фильтра. Рекомендации реализованы в трёх сериях систем впуска, позволивших существенно повысить мощность двигателей ГАЗ: V-8 5,5 и 4,25 и Р-4 2,45 л для легковых автомобилей Чайка и Волга-люкс: ГАЗ - мощность спортивной модели двигателя ГАЗ-24 с 95 до 125, а ЦНИТА - двигателя ГАЗ-14 с 220 до 250 л.с.

Турбогазодинамический наддув.

Разработана и защищена авторским свидетельством впускная система комбинированного наддува в V-образных дизелях и двигателях с впрыском бензина с турбонаддувом, высокой степенью равномерности наполнения цилиндров и безпомпажной работой компрессора на всех режимах.

По результатам расчётов выданы УМЗ рекомендации по форсированию на 20-25% бензинового 2-клапанного двигателя УМЗ-406.10 (2,3 л) при неизменной степени сжатия за счёт турбонаддува без промежуточного охлаждения воздуха.

Проанализирована правильность выбора в техническом проекте 100-сильного дизеля УМЗ-406 Д (2,45 л) на базе 2-клапанного бензинового УМЗ-406 схемы и параметров газораспределения, ГВТ, системы наддува с охлаждением воздуха как средств обеспечения требований ТЗ. Расчётами выбраны лучшие из исследованных варианты распредвала и фаз газораспределения, уточнены диаметр и длина заборного и впускных патрубков, степени наддува ($\pi_k = 1,6-1,7$) и охлаждения (0,7).

Управляемые газодинамический наддув и воздухообеспечение.

Расчётами исследованы 3- и 4-клапанные двигатели АЗЛК-21412 и –21416, конструкторская проработка которых была выполнена НАМИ-АЗЛК в 1987 г. Базовый 2-клапанный АЗЛК-21414 использовался для идентификации рабочего цикла, а результаты его расчёта – для сравнения с двигателями с управляемым воздухомоснабжением. Управление фазами и проходным сечением впускного канала в соответствии с механизмом газораспределения НАМИ осуществлялось угловым смещением впускного распредвала относительно выпускного и перекрытием одного из трёх впускных каналов и двух клапанов. Оптимизацией параметров неуправляемых моделей определён алгоритм ступенчатого углового смещения впускного распредвала управляемого АЗЛК-21416, обеспечивший 0-10% повышение энергетических показателей и уменьшение расхода топлива на 0-2%.

Расчётами 4-клапанного ЗМЗ-406.10 выполнено ТЗ базовой и дефорсированной модификаций (150 и 125 л.с. при 5200 и 4500 мин⁻¹): оптимизированы кулачки и левые ветви скоростных характеристик обоих двигателей за счёт углового сдвига распредвалов, уточнения фаз, подъёма клапанов, длины впускных патрубков. Двигатели с рекомендованными параметрами и алгоритмом ступенчатого изменения профилей впускных кулачков обеспечивают топливно-энергетические показатели на уровне лучших зарубежных аналогов. Дополнительно оптимизированы алгоритмы углового сдвига серийного впускного распредвала до 30° п.к.в. и изменения длины впускных патрубков, обеспечившие двигателю ЗМЗ-406.10 более высокие показатели, чем управляемого АЗЛК-21416. Рассмотренные разработки не потеряли актуальности и практической значимости для развития автомобильных ДВС.

ТЕХНИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ СОВРЕМЕННЫХ ТУРБОКОМПРЕССОРОВ С РАДИАЛЬНОЙ ТУРБИНОЙ

Клима Й., (ООО *PBS Turbo*, Велка Битеш, Чешская Республика)

Вавра Р., (АО *Alta*, Брно, Чешская Республика)

Введение. Развитие транспорта и децентрализация производства электроэнергии ведет к росту использования поршневых двигателей, преимущества и выгоды которых по сравнению с газовыми турбинами находят применение прежде всего при низких мощностях. Сильная конкуренция ведет к повышению удельных мощностей, что уже в течение многих лет у поршневых двигателей нельзя представить без наддува.

Долгие годы разработка турбокомпрессоров (в дальнейшем ТК) исходила из сведений в области газовых турбин и авиационных двигателей. Поэтому первые ТК имели аксиальные турбины. Последовательные разработки в области наддува все меньших двигателей и стремление к компактности конструкции вели к использованию ТК с радиальной турбиной. В настоящее время для автомобилей они производятся уже в массовом масштабе.

Развитие радиальных машин. Разработку в области ТК можно разделить на три главных области:

- развитие компрессора, который подчиняется прежде всего росту сжатия;
- требования к компактности конструкции, что вело к использованию радиально-аксиальной турбины;
- разработка посадки ротора.