М 383309

НА ДОМ НЕ ВЫДАЕТСЯ

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ СССР

Московское ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени высшее техническое училище имени Н.Э.Баумана

На правах рукописи

ГУСЕВ АЛЕКСАНДР ВАСИЛЬЕВИЧ

НЕСТАЦИОНАРНОЕ ТЕЧЕНИЕ ГАЗА В РАЗВЕТВЛЕНИЯХ СИСТЕМЫ ВОЗДУХОСНАБЖЕНИЯ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

(05.04.02 - тепловые двигатели)

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 1981

Работа выполнена в Московском высшем техническом училище имени Н.Э. Баумана.

Научный руководитель – Заслуженный деятель науки и техники РСФСР, доктор технических наук, профессор КРУГЛОВ М.Г.

Официальные оппоненты – доктор технических наук, профессор МАХАНЬКО М.Г.

кандидат технических наук, доцент ШАБАРОВ А.Б.

Ведущее предприятие – Головное специализированное конструкторское бюро по двигателям /ГСКБД/, г. Харьков.

Защита состоится "30" апреля 1981 г. в "14" часов на заседании специализированного Совета К.053.I5.05 "Тепловые машины и теоретические основы теплотехники" Московского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени высшего технического училища имени Н.Э. Баумана по адресу: Моск
режная, д.I, корпус "Энер

С диссертацией можн
имени Н.Э. Баумана.

Автореферат разосл

Ваши отзывы в 2-х
сылать по адресу: Москва
МВТУ, учёному секретарю

Учёный секрета
специализированного
кандидат технических
доцент

М 383309

Типография МВТУ им. Н.Э
Подписан к печати I6.IC

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. В выполнении задач по повышению технического уровня современного двигателестроения, определённых в "Основных направлениях экономического и социального развития СССР на 1981-1985 г.г. и на период до 1990 года", важное место занимают исследования газодинамических явлений в системах воздухоснабжения двигателей внутреннего сгорания (ДВС) и их использование для улучшения показателей ДВС.

Параметры конструкции этих систем непосредственно влияют на неравномерность наполнения цилиндров свежим зарядом и качество их очистки от продуктов сгорания, на величину располагаемой энергии газов перед турбиной и К.П.Д. турбокомпрессора, на экономичность, мощность, моторесурс двигателя, токсичность выпускных газов.

№ 883309

Применяемые до настоящего времени расчётные методы исследования подобных систем основываются на упрощающих допущениях (равенство давлений в ответвлениях тройника, изэнтропность течения, модель "импульсная ёмкость" и др.), которые не позволяют с необходимой точностью рассчитывать течение газа в местных сопротивлениях типа дроссель, сопловое кольцо, тройник, поворот, резкое изменение проходного сечения и т.д. В литературе практически отсутствуют экспериментальные и теоретические данные по определению и использованию коэффициентов местного сопротивления в этих узлах. Всё это затрудняет структурную и параметрическую оптимизацию систем воздухоснабжения ДВС, а также расчётное определение параметров газообмена и рациональных геометрических характеристик выпускной системы четырёхтактного двигателя.

Цель работы. Целью диссертационной работы является разработка и экспериментальная проверка уточнённых граничных условий в тройнике, повороте и скачке площади сечения, необходимых для расчёта нестационарного течения газа в разветвлённых системах воздухоснабжения ДВС, а также расчётное определение параметров газообмена и рациональных геометрических характеристик выпускной системы четырёхтактного двигателя.

Методы исследования. Теоретическая часть работы основана на применении метода распада произвольного разрыва для расчёта течения газа как на прямолинейных участках каналов, так и на местных сопротивлениях. Для теоретического определения коэффициента местного сопротивления в повороте и симметричном тройнике использованы методы теории струй идеальной несжимаемой жидкости. Экспериментальные исследования течения газа

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



МВТУ им. Н.Э. Б... БИБЛИОТ...

в тройниках и коленах проводились путём физического моделирования на установке с ударной трубой.

Все расчёты выполнялись на ЭВМ ЕС-1033 в операционной системе ОС ЕС по программам на языке Фортран-4.

Научная новизна. С помощью метода С.К.Годунова получено обобщённое решение уравнений газовой динамики для течения газа в разветвлённом газовоздушном тракте ДВС с местными сопротивлениями. Система соотношений на местных сопротивлениях замыкается благодаря использованию коэффициента местного сопротивления, значения которого для типичных конфигураций колен и симметричных тройников определены теоретически.

Разработаны алгоритмы и программы расчёта граничных условий в тройнике, повороте и скачке площади сечения, основанные на применении метода распада произвольного разрыва.

Кроме того, разработаны алгоритмы и программы расчёта процесса выпуска газов из одноцилиндрового двигателя с учётом изменения параметров по длине цилиндра и процесса выпуска из двухцилиндрового двигателя с разделёнными коллекторами, соединяющимися перед турбиной. Экспериментально подтверждена применимость коэффициентов местного сопротивления, полученных для стационарного потока, при расчёте нестационарного течения методом распада произвольного разрыва, основанная на том, что в методе выделяются такие зоны в непосредственной близости от местного сопротивления, течение в которых можно принимать стационарным на расчётном интервале времени.

Практическая ценность. Разработанные алгоритмы и программы расчёта граничных условий в местных сопротивлениях и течения газа на прямолинейных участках трубопроводов отвечают требованию унификации и принципу модульности, позволяют рассчитывать все возможные (в том числе и разрывные) течения газа по единому алгоритму. В связи с этим они могут быть включены в единую систему автоматизированного проектирования ДВС с целью выбора рациональных конструкций газовоздушных трактов двухтактных и четырёхтактных двигателей ещё на стадии проектирования. В результате сокращаются затраты средств и времени на натурный эксперимент и доводку систем воздухоснабжения многоцилиндровых ДВС.

В диссертационной работе расчётным способом определено влияние газодинамических явлений в выпускной системе на показатели газообмена двигателей 12ЧН2I/2I и ЧН13/14 (типа ЯМЗ).

Реализация работы в производстве. Разработанные программы

и выполненные расчётно-экспериментальные исследования внедрены на производственном объединении "Звезда", что подтверждено актом о внедрении.

Апробация работы. Диссертационная работа заслушана на заседании кафедры "Комбинированные двигатели внутреннего сгорания" МВТУ им.Н.Э.Баумана в январе 1981 года. По основным разделам работы были сделаны доклады на научно-технической конференции "Агрегаты наддува и их совместная работа с дизелями" в мае 1980 года в г.Челябинске, на Всесоюзной научно-технической конференции "Перспективы развития комбинированных двигателей внутреннего сгорания и двигателей новых схем и топлив" в октябре 1980 года в г.Москве и на семинарах молодых учёных и специалистов кафедры в 1980, 1981 г.г.

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы в 4 печатных работах.

Объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав и выводов. Она содержит 142 страницы основного текста, 49 страниц с иллюстрациями, 1 таблицу, а также список использованной литературы, включающий 194 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе анализируются существующие методы расчёта нестационарного течения газа в системах воздухоснабжения ДВС, методы расчёта граничных условий в разветвлениях, способы теоретического определения и практического использования коэффициентов местного сопротивления.

Анализ показывает, что в настоящее время при исследовании течения в газовоздушном тракте ДВС наибольшее применение нашли одномерные модели газовой динамики. Газовоздушный тракт разбивается на прямолинейные участки, соединяющиеся между собой в особых узловых сечениях. В этих сечениях определяются внутренние граничные условия, которые представляют собой условия сопряжения соседних участков течения на различных сопротивлениях (скачок площади поперечного сечения, поворот, диафрагма, тройник и т.д.). Кроме того, необходимо определять внешние по отношению к газовоздушному тракту граничные условия (цилиндр, турбина, компрессор, глушитель, ёмкость и т.д.).

Течение газа на прямолинейных участках трубопроводов описывается системой квазилинейных уравнений газовой динамики (уравнениями Эйлера) или её упрощёнными модификациями. Наибольшее распространение в двигателестроении получил сеточно-харак-

теристический метод численного решения уравнений Эйлера, развитый в работах А.С.Орлина, М.Г.Круглова, Б.А.Киселёва, Б.П. Рудого, Е.Джени, Г.Листа, Р.Бенсона, Х.Зейферта и др.

Применяемые в двигателестроении граничные условия в разветвлениях рассматриваются в упрощённых постановках, таких как равенство давлений в ответвлениях (Г.Лист и Г.Рейл, Р.Бенсон, О.Г.Красовский и др.), модель "импульсная ёмкость" (Х.Зейферт, Б.А.Киселёв и др.), использование системы поправочных коэффициентов в записи уравнения импульсов (Р.Бенсон, В.Деккер и Д.Мейл и др.).

Несмотря на большое количество работ, посвящённых численному моделированию нестационарного течения газа в системах воздухоснабжения ДВС, до настоящего времени как в отечественном, так и в зарубежном двигателестроении отсутствует комплекс программ, который бы удовлетворял основным требованиям практики: надёжности в эксплуатации, простоты и удобства в обслуживании, возможности расчёта произвольных конфигураций каналов на всех режимах работы двигателя и т.д.

В качестве базового метода при разработке такого комплекса может с успехом использоваться метод распада произвольного разрыва. Метод предусматривает определение параметров за фронтами элементарных волн, провзаимодействовавших с местным сопротивлением. В промежутках между двумя последующими взаимодействиями течение газа через рассматриваемое местное сопротивление считается установившимся. Перепад параметров на фронтах волн определяется либо с помощью уравнений нестационарного одномерного течения (В.Г.Дулов, С.В.Павлов, И.К.Яушев), либо с помощью газодинамических функций, полученных из этих уравнений (Б.П.Рудой). В сочетании с численным методом распада разрыва С.К.Годунова метод позволяет конструировать решение по единой алгоритмической схеме при любых (в том числе разрывных) начальных данных и произвольных местных сопротивлениях и является поэтому весьма эффективным при определении общего поведения газа в сложных разветвлённых системах каналов ДВС с местными сопротивлениями.

В этой связи задачами настоящей работы являются:

– разработка на основе теории распада произвольного разрыва метода определения уточнённых внутренних граничных условий в местных сопротивлениях (поворот, тройник, резкое изменение сечения) газовоздушного тракта ДВС и алгоритмов и программ для

численного решения полученных зависимостей;

- теоретическое определение коэффициентов местного сопротивления в коленах наиболее распространённых конфигураций и в соответствующих им симметричных тройниках;

- разработка экспериментальной установки, методики экспериментальной проверки предлагаемых граничных условий, проведение экспериментальных исследований, анализ результатов и сопоставление полученных экспериментальных данных с результатами расчёта;

- разработка практических рекомендаций по применению предложенных алгоритмов и программ и полученных экспериментальных данных к расчёту разветвлённых систем впускных и выпускных каналов ДВС и к выбору рациональных размеров каналов выпускной системы двигателя 12ЧН21/21.

Во второй главе излагается расчёт течения газа на прямолинейных участках газовоздушного тракта ДВС, разработанный на базе численного метода распада разрыва С.К.Годунова. Изложены основы метода, приведены итерационный процесс для расчёта распада разрыва с учётом всех качественно возможных конфигураций, конечно-разностная схема с учётом и без учёта трения и теплообмена, внешние граничные условия и условия устойчивости разностной схемы.

Задача о распаде произвольного разрыва в прямолинейных участках трубопроводов состоит в определении плотности $\rho(x,t)$, скорости $u(x,t)$, давления $p(x,t)$, удельной внутренней энергии $e(x,t)$ слева и справа от начального разрыва, как функций времени t и пространственной координаты x, описывающих течения газа при $t>0$, если в начальный момент $t=0$ параметры по обе стороны разрыва заданы. Решение задачи строится в классе автомодельных течений идеального газа, удовлетворяющих интегральным законам сохранения:

$$\oint \rho\,dx - \rho u\,dt = 0\,, \tag{1}$$

$$\oint \rho u\,dx - (p+\rho u^2)\,dt = 0, \tag{2}$$

$$\oint \rho\left(e+\frac{u^2}{2}\right)dx - \left[\rho u\left(e+\frac{u^2}{2}\right)+pu\right]dt = 0\,, \tag{3}$$

уравнению состояния:

$$p = (\kappa-1)\rho e \tag{4}$$

и закону неубывания энтропии :

$$\oint \rho S\,dx - \rho u S\,dt \le 0\,. \tag{5}$$

Итерационный процесс для расчёта распада разрыва строится с помощью метода (p,u) - диаграмм, состоящего в определении точки пересечения двух монотонных кривых в плоскости переменных p,u,

каждая из которых состоит из адиабаты Гюгонио и адиабаты Пуассона с одним общим центром.

При решении задачи о течении газа на прямолинейном участке трубопровода постоянного сечения в соответствующей этому участку расчётной области определяется разностная сетка с координатами узлов x_i. Расчёт параметров $(u, \rho, p, e)^{n+1}_{i-\frac{1}{2}}$ в каждом интервале $x_i - x_{i-1}$ следующего временного слоя производится по параметрам $(u, \rho, p, e)^{n}_{i-\frac{1}{2}}$ с предыдущего временного слоя и граничным значениям параметров в два этапа. На первом этапе решается задача о распаде произвольного разрыва на границах соседних интервалов. В результате определяются граничные величины R_i^-, R_i^+, $U_i^-, U_i^+, P_i^-, P_i^+$ – соответственно плотности, скорости и давления слева (–) и справа (+) от x_i. На втором этапе производится интегрирование уравнений (I–3) вдоль границ пространственно-временных ячеек плоскости переменных x, t в течение времени от t_n до t_{n+1} в предположении, что величины $R_i^-, R_i^+, U_i^-, U_i^+$ и т.д.– постоянные вдоль соответствующих вертикальных границ, а величины $\rho_{i-\frac{1}{2}}$, $u_{i-\frac{1}{2}}, p_{i-\frac{1}{2}}, \rho_{i+\frac{1}{2}}$ и т.д.– постоянные на соответствующих горизонтальных границах.

Тогда интегральные законы сохранения для ячейки с номером $i-\frac{1}{2}$ с учётом трения и теплообмена со стенками запишутся в виде:

$$\rho^{n+1}_{i-\frac{1}{2}} = \rho^{n}_{i-\frac{1}{2}} \frac{t_{n+1} - t_n}{x_i - x_{i-1}} \left[(RU)^-_i - (RU)^+_{i-1} \right]; \qquad (6)$$

$$(\rho u)^{n+1}_{i-\frac{1}{2}} = (\rho u)^{n}_{i-\frac{1}{2}} \left[1 - (t_{n+1} - t_n) \cdot \frac{\lambda_T \cdot |u^n_{i-\frac{1}{2}}|}{2 D_e} \right] - \frac{t_{n+1} - t_n}{x_i - x_{i-1}} \left[(P + RU^2)^-_i - (P + RU^2)^+_{i-1} \right]; \qquad (7)$$

$$E^{n+1}_{i-\frac{1}{2}} = E^{n}_{i-\frac{1}{2}} - \frac{t_{n+1} - t_n}{x_i - x_{i-1}} \left[(RUH)^-_i - (RUH)^+_{i-1} \right] + \frac{4\alpha_T (t_{n+1} - t_n)}{D_e} \times \left(p^n_{i-\frac{1}{2}} / R_g \rho^n_{i-\frac{1}{2}} - T_{ст} \right), \qquad (8)$$

где λ_T и α_T – коэффициенты трения и теплоотдачи; $T_{ст}$ и D_e – температура стенки и гидравлический диаметр трубопровода; R_g – газовая постоянная; $E = \rho(e + \frac{u^2}{2})$ – полная удельная энергия; $H = e + \frac{p}{\rho} + \frac{u^2}{2}$.

Зависимости (6–8) справедливы и в общем случае расчёта течения газа в трубопроводе с местными сопротивлениями независимо от того, попадёт ли узел с номером i в расчётную область, где сечение трубопровода постоянное, либо узел с номером i соответствует элементу газовоздушного тракта ДВС, обладающему гидравлическим сопротивлением. При рассмотрении распада произвольного разрыва на местном сопротивлении физический смысл величин R_i^+, R_i^-, U_i^+, U_i^- и т.д. остается прежним, но трудности в определении

значений этих величин неизмеримо возрастают.

В третьей главе рассматривается постановка задач о распаде произвольного разрыва в местных сопротивлениях (скачке площади сечения, колене, тройнике) газовоздушного тракта ДВС, приводятся критерии для определения направления течения и алгоритмы решения поставленных задач, решается задача о теоретическом определении коэффициентов местного сопротивления в повороте и симметричном тройнике, приводится блок-схема программы расчёта течения газа в выпускной системе с разветвлением. Постановка задачи о распаде произвольного разрыва для случая двух прямолинейных каналов, различающихся величинами площадей поперечного сечения и соединяющихся между собой под некоторым углом β, формулируется следующим образом. В начальный момент времени $t=0$ слева от местного сопротивления ($x<0$) задано произвольное состояние газа 1° (p_1^*, u_1^*, ρ_1^*), а справа ($x>0$) – произвольное состояние 2° (p_2^*, u_2^*, ρ_2^*). При $t>0$ происходит распад произвольного разрыва, в результате расчёта которого выделяются области постоянного течения, разделённые между собой элементарными волнами. Требуется найти одномерное течение газа, удовлетворяющее в каждой из частей $x>0$ и $x<0$ в плоскости переменных x,t при $t\geqslant 0$ интегральным законам сохранения (I-3); на прямой $x=0$ – некоторым условиям сопряжения.

В рамках принятой постановки в качестве условий сопряжения на местном сопротивлении могут быть использованы уравнения сохранения массы и энергии для стационарного течения газа

$$A_1\rho_1 u_1 = A_2\rho_2 u_2 , \tag{9}$$

$$e(p_1,\rho_1)+\frac{p_1}{\rho_1}+\frac{u_1^2}{2}=e(p_2,\rho_2)+\frac{p_2}{\rho_2}+\frac{u_2^2}{2} \tag{10}$$

и зависимость

$$\zeta_{12}=\frac{p_1\left(1+\frac{K-1}{2}M_1^2\right)^{\frac{K}{K-1}}}{\rho_1\frac{u_1^2}{2}}\left[1-\frac{p_2\left(1+\frac{K-1}{2}M_2^2\right)^{\frac{K}{K-1}}}{p_1\left(1+\frac{K-1}{2}M_1^2\right)^{\frac{K}{K-1}}}\right], \tag{11}$$

выполняющая функцию уравнения сохранения количества движения. После необходимых преобразований условия сопряжения (9-11) приобретают вид, полученный И.К.Яушевым и С.В.Павловым:

$$\left(\frac{M_1}{\alpha_{12}M_2}\right)^{\frac{K-1}{2}}\cdot\left(\frac{1+\frac{K-1}{2}M_2^2}{1+\frac{K-1}{2}M_1^2}\right)^{\frac{K+1}{4}}=z_{12}(M_1) \tag{12}$$

$$\frac{u_2}{u_1} = a_{12}(M_1, M_2) = \frac{M_2}{M_1}\left(\frac{1 + \frac{K-1}{2} M_1^2}{1 + \frac{K-1}{2} M_2^2}\right)^{\frac{1}{2}}, \qquad (13)$$

$$\frac{p_2}{p_1} = b_{12}(M_1, M_2) = \frac{M_1^2}{M_2^2} \cdot \frac{a_{12}(M_1, M_2)}{\alpha_{12}}, \qquad (14)$$

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{b_{12}(M_1, M_2)}{a_{12}^2(M_1, M_2)} \cdot \frac{M_2^2}{M_1^2}, \qquad (15)$$

где $\alpha_{12} = A_2/A_1$ – отношение площадей поперечного сечения каналов, $M = \frac{u}{c}$ – число Маха, $c = \sqrt{\frac{kp}{\rho}}$ – скорость звука, $\zeta_{12} = \frac{\Delta E}{\rho_1 \frac{u_1^2}{2}}$ – коэффициент местного сопротивления, значения которого могут быть определены экспериментально или теоретически в зависимости от угла β и величины α_{12}, ΔE – потерянная механическая энергия. Функция $z_{12}(M_1)$ после соответствующих преобразований имеет вид :

$$z_{12}(M_1) = \left[\frac{1 + \frac{K-1}{2} M_1^2}{1 + \frac{K-1}{2} M_1^2 (1 + \zeta_{12})}\right]^{\frac{K}{2}} \qquad (16)$$

В случае $\beta = 0$, $\alpha_{12} = 1$ вместо соотношения (11) целесообразно использовать выражение для реакции стенки, соединяющей трубопроводы различных диаметров. Экспериментально установлено, что реакцию стенки p' можно задать следующим образом для потока, направленного слева направо :

$p' = p_1' + \rho_1 u_1^2$ при $\alpha_{12} < 1$,
$p' = p_1$ при $\alpha_{12} > 1$, $M_1 < 1$,
$p' = p_2$ при $\alpha_{12} > 1$, $M_1 \geq 1$.

В этом случае уравнение сохранения количества движения записывается непосредственно:

$$A_1(p_1 + \rho_1 u_1^2) + (A_2 - A_1)p' = A_2(p_2 + \rho_2 u_2^2), \qquad (17)$$

и задавать значения коэффициента ζ_{12} нет необходимости.

В ходе построения решения задачи о распаде произвольного разрыва на местных сопротивлениях рассматриваются все условия, при которых возникают те или иные конфигурации распада разрыва.

Постановка задачи о распаде произвольного разрыва в разветвлении формулируется точно так же, как и в предыдущей конфигурации каналов, только количество соединённых в узле каналов, а следовательно, и начальных состояний увеличивается до трёх.

Решение этой задачи производится в три этапа. На первом этапе определяется тип течения в разветвлении (слияние или разделение потоков) и направления течения после распада разрыва. На

втором этапе решаются две задачи о распаде произвольного разрыва для двух потоков, изменяющих направление течения в разветвлении. Для этого в выражениях (I2) и (I4), применённых к каждому потоку, вместо величины α_{12} следует использовать $\alpha_{n\ell} = A_{\ell n}/A_{n\ell}$, где $A_{\ell n}(A_{n\ell})$ – частичная площадь поперечного сечения канала $\ell(n)$, занятая потоком, перетекающим из канала $n(\ell)$. Если поток из n-го канала в ℓ-ый отсутствует, то $A_{n\ell} = A_n$.

На третьем этапе находится значение $\alpha_{n\ell}$, при котором два распада разрыва, рассчитанные на втором этапе, дадут одно и то же состояние в канале n.

Значения коэффициента ζ_{12} для типичных конфигураций колен и соответствующих им симметричных тройников получены по разработанной автором методике с использованием конформного отображения $z(h,t)$ области течения на полукруг единичного радиуса плоскости комплексной переменной t. Общий вид конформного отображения определяется в интегральной форме. Частные выражения $z(h,t)$ находятся для различных значений угла поворота φ (параметр h связывает скорости потока $V_н$ – до поворота и V_o – после поворота: $V_н/V_o = h^{\mu}$, где $\mu = \varphi/\pi$). Значения параметра h и комплексной переменной t определяются из системы трансцендентных уравнений, получаемых из соотношений между площадями поперечных сечений до и после поворота потока (в нашем случае $A_1 = A_2$):

$$\mathrm{Im}\left[z(h,t) - z(h,1)\right] - 1 = 0,$$
$$\mathrm{Re}\left[z(h,t) - z(h,1)\right] - 1/\sin(\pi\mu) = 0,$$

где параметры t и h изменяются соответственно в пределах: $-1 \le t < 0$, $0 < h \le 1$. По найденному параметру h из выражения $V_н/V_o = h^{\mu}$ с учётом несжимаемости потока определяется площадь поперечного сечения струи A_{12} после поворота и коэффициент сужения струи $\psi = A_{12}/A_2$. Значение коэффициента ζ_{12} определяется по известной зависимости, справедливой при расширении потока от величины площади поперечного сечения струи A_{12} до A_2:

$$\zeta_{12} = \gamma\left(\frac{1}{\psi} - 1\right)^2 \qquad (18)$$

где $\gamma = 3/2$ – поправочный коэффициент на неравномерность распределения вектора скорости по сечению канала. На рис.1 представлены экспериментальные зависимости, полученные различными авторами для колен, составленных из труб с одинаковой площадью поперечного сечения. Там же показаны результаты расчётов по изложенной выше методике.

<u>В четвёртой главе</u> описаны экспериментальная установка и методика экспериментального исследования, даётся оценка погреш-

ностей измерения экспериментальных величин.

В настоящей работе проверка достоверности разработанных граничных условий в тройнике и колене проводится на ударной трубе, т.е. в экстремальных, наиболее сложных, с точки зрения расчёта, условиях – в условиях взаимодействия ударных волн с этими узлами. Преимуществами ударной трубы являются простота получения нестационарного потока, стабильность режима, однородность параметров среды за фронтами ударных волн. Кроме того, вследствие простоты конструкции и достаточно точного задания начальных параметров ударная труба обладает высокой воспроизводимостью результатов эксперимента.

Полученные осциллограммы изменения полного и статического давлений и значения скорости, определяемые по ним, сопоставлялись с расчётными кривыми на промежутке времени $\Delta t \sim 0.05$ сек с момента разрыва мембраны. Это давало возможность оценить точность численного расчёта взаимодействия прямых и отражённых волн с тройниками и коленами различных конфигураций. Измерительная система состояла из индуктивных малогабаритных датчиков давления ДМИ-2-6, тензометрических усилителей ТА-5, шлейфового осциллографа Н115 с шлейфами типа М004 чувствительностью 1200 Гц. Устойчивость настройки моста ТА-5, стабильность и линейность тарировочных кривых обеспечивалась подбором добавочных сопротивлений для каждого измерительного канала. Суммарная погрешность определения мгновенного давления не превышала 4,6%.

Рабочая серия экспериментов выполнялась для трёх значений начального давления в камере высокого давления $P_н = 0.186$, 0.275, 0.363 МПа. Для тройников проводились дополнительные серии экспериментов с закрытым концом одного из ответвлений.

В пятой главе приведены результаты расчётных и экспериментальных исследований нестационарного течения газа в коленах и тройниках типичных для газовоздушного тракта ДВС конфигураций, проведено сопоставление результатов расчёта выпуска газов с осциллограммами изменения давления, замеренного в цилиндре и выпускном трубопроводе одноцилиндрового двигателя ЧН13/14 (типа ЯМЗ), определено расчётным способом влияние газодинамических явлений в выпускной системе на показатели газообмена в цилиндрах двигателя 12ЧН21/21.

Уточнённые граничные условия проверялись для конфигураций колен с углом β, изменяющимся в промежутке от 30° до 90°, и для тройников с углом β между осями входной и боковой ветви, изменяющимся от 30° до 150°.

Во всех расчётах нестационарного течения газа в коленах и тройниках использовались коэффициенты местного сопротивления ζ_{12}, полученные для стационарного потока (для колен ζ_{12} вычислялось по формуле (18)).

На рис.2 для трёх режимов исследования приведены зависимости скорости u_t – в основной и $u_б$ – в боковой ветвях от угла β, вычисленные по известному соотношению на ударной волне:

$$u = \frac{p - p_0}{\sqrt{\rho_0\left(\frac{\kappa+1}{2}p + \frac{\kappa-1}{2}p_0\right)}}$$

где p – давление за фронтом, ρ_0, p_0 – соответственно плотность и давление перед фронтом ударной волны.

Аналогичные зависимости для давлений представлены на рис.3. С увеличением β возрастает различие параметров u_t, p_t и $u_б$, $p_б$. Для начального давления в камере высокого давления $P_н$ = = 0.363 МПа значения скорости $u_б$ и давления $p_б$ (диаграммы 5 соответственно на рис.2 и рис.3) уменьшаются с изменением угла β от 45° до 90° значительно быстрее, чем для $P_н$ = 0.186 МПа (диаграмма I) и $P_н$ = 0.275 МПа (диаграмма 3). Это явление объясняется перестройкой конфигураций элементарных волн внутри тройника.

Расчётные значения скорости и давления совпадают с экспериментальными с точностью не ниже чем 5%. Такую же точность дают результаты сопоставления расчётов с экспериментальными данными Деккера и Мейла. Это объясняется тем, что в разработанных уточнённых граничных условиях итерационные процессы, сопрягающие одномерные течения по разные стороны от местного сопротивления, строятся с учётом местных значений параметров в непосредственной близости от местного сопротивления, которые могут существенно отличаться от параметров в набегающей волне вследствие взаимодействия её передней части с местным сопротивлением.

В рамках принятой постановки решена также задача о течении газа в системе цилиндр–выпускной трубопровод с учётом изменения параметров по длине цилиндра. В расчёте принято, что цилиндр и трубопровод одноцилиндрового двигателя ЧН13/14 (типа ЯМЗ) объединены в систему двух прямолинейных каналов, соединённых между собой третьим каналом малой протяжённости и переменной площади поперечного сечения, соответствующей площади проходного сечения выпускного клапана. На поршне граничные условия задаются как на движущейся непроницаемой для газа стенке, на входе в ёмкость задаётся условие постоянства давления. При расчёте нестационар-

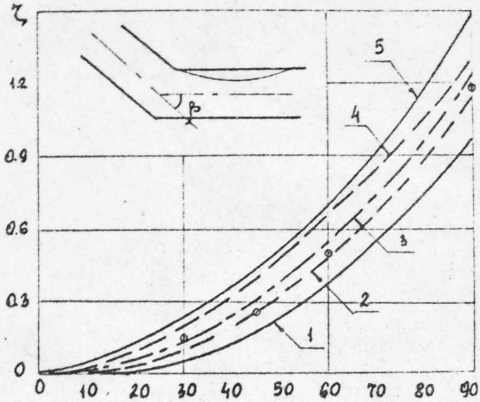


Рис.I. Экспериментальные зависимости коэффициента ζ от β, полученные: I- Weisbach, 2-Kirchbach, 3- Gibson, 4- Schubart, 5- Bambuch, ... - по формуле I8

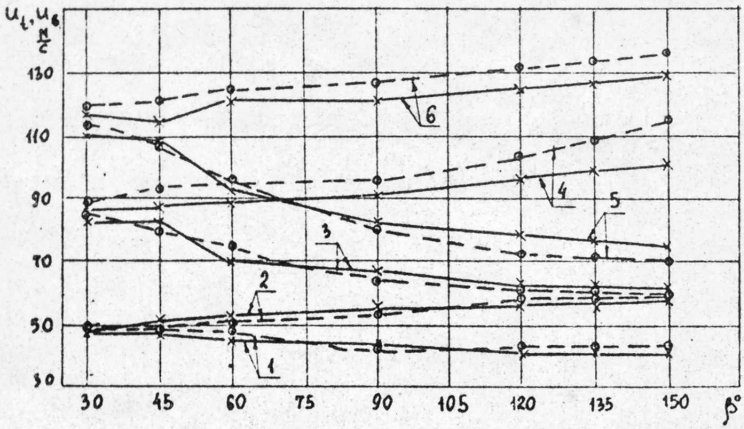


Рис.2. Зависимости скоростей за фронтами ударных волн от угла β между основной и боковой ветвями разветвления: 1- u_t и 2- u_1 при P_1=0.I86МПа; 3- u_6 и 4- u_1 при P_1=0.275МПа; 5- u_t и 6- u_1 при P_1=0.363МПа; —— эксперимент; - - - расчёт

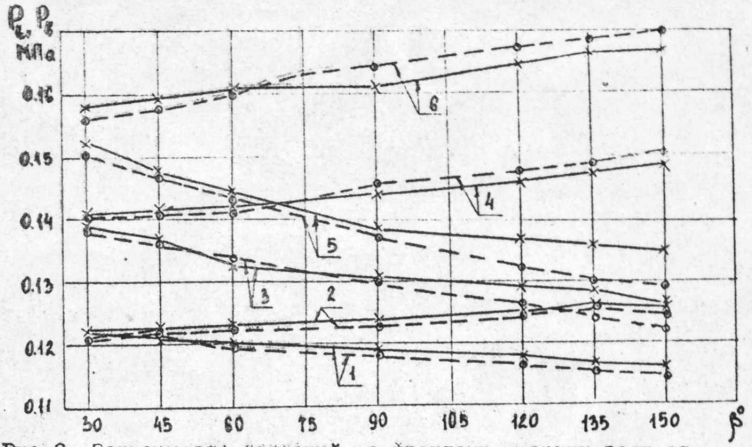


Рис.3. Зависимости давлений за фронтами ударных волн от угла β между основной и боковой ветвями ответвления: 1– $P_г$ и 2– $P_в$ при $P_н$ =0.186МПа; 3– $P_г$ и 4– $P_в$ при $P_н$ =0.275МПа; 5– $P_г$ и 6– $P_в$ при $P_н$ =0.363МПа; ——— эксперимент; – – – расчёт

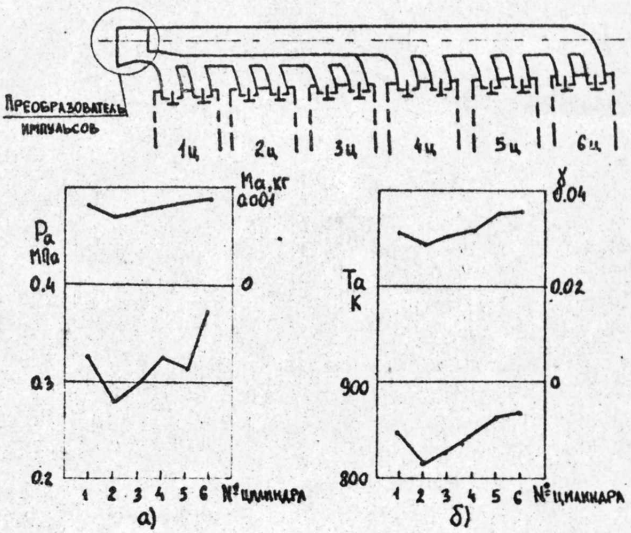


Рис.4. Диаграммы изменения давления $P_а$ и массы $M_а$ (а), температуры $T_а$ и коэффициента остаточных газов γ (б) по цилиндрам одного ряда двигателя 12ЧН21/21

ных явлений в цилиндре, возникающих в результате многократного отражения волн от поршня и крышки цилиндра, применяется подвижная разностная сетка. В такой постановке потери в соединительном канале учитываютс неявно в уравнении импульсов (I7), поэтому использовать коэффициент расхода μ нет необходимости.

Расчёт течения газа в сложных разветвлённых системах выпускных трубопроводов ДВС можно упростить за счёт выделения основных факторов, влияющих на газообмен в различных цилиндрах. Выпускная система каждого ряда цилиндров двигателя I2ЧН2I/2I состоит из двух разделённых коллекторов, имеющих общий выход на турбину через преобразователь импульсов тройник . Поэтому основным фактором, влияющим на газообмен в цилиндре, является выпуск газов из цилиндров, объединённых смежным коллектором и имеющих перекрытие фаз открытия выпускных клапанов с рассматриваемым цилиндром. В работе изучено взаимное влияние выпусков из двух цилиндров, объединённых смежными коллекторами. Основные результаты анализа приведены на рис.4.

ВЫВОДЫ

I. Разработаны метод расчёта нестационарного течения газа в разветвлённом газовоздушном тракте ДВС и комплекс программ для ЭВМ, базирующиеся на последовательном применении метода распада произвольного разрыва и обеспечивающие определение расчётным способом рациональных размеров коллекторов и показателей газообмена в каждом цилиндре двигателя во взаимосвязи с процессами в других цилиндрах, в газовоздушном тракте и перед турбиной. Модульный принцип структурного формирования комплекса, унифицированность подпрограмм, стандартность реализации внутренних и внешних граничных условий, возможность расчёта любых (в том числе разрывных) течений, относительная простота стыковки одномерных и многомерных участков течения составляют основные преимущества предлагаемого подхода по сравнению с существующими в двигателестроении.

2. Точность расчёта граничных условий на местных сопротивлениях повышается за счёт отказа от допущений, упрощающих расчётные модели (таких как, равенство давлений в ответвлениях тройника, модель "импульсная ёмкость", предположение об изэнтропности течения и т.д.), а также благодаря учёту всех возможных конфигураций элементарных волн при определении решения задачи о распаде произвольного разрыва на местных сопротивлениях.

3. Применяемая для расчёта нестационарного течения газа на прямолинейных участках трубопроводов ДВС конечно-разностная схема метода С.К.Годунова обладает свойством дивергентности (консервативности), поэтому интегральные законы сохранения выполняются в любой части расчётной области, что позволяет рассчитывать внутренние граничные условия для любого (в том числе подвижного) узла разностной сетки без изменения расчёта в в целом. Кроме того, в методе С.К.Годунова отсутствуют дополнительные интерполяционные процессы, типичные для так называемых сеточно-характеристических методов, и связанная с ними потеря точности.

4.Анализ результатов расчётно-экспериментального исследования показал, что гипотеза о равенстве давлений в ответвлениях, равно как и гипотеза об "импульсной ёмкости", может привести к ошибкам при расчёте течения газа через разветвление даже для малых углов между боковым ответвлением и основной ветвью и скоростях течения порядка 50-80м/с.

В результате сопоставления расчёта взаимодействия ударных волн с разветвлениями методом распада разрыва и эксперимента Деккера и Мейла получено лучшее совпадение с экспериментом, чем по методике, предложенной этими авторами.

5. Методами теории струй идеальной жидкости получены зависимости для теоретического определения значения коэффициента местного сопротивления для четырёх конфигураций колен с одинаковыми площадями поперечных сечений выходной и входной ветви. Использование этих значений коэффициентов при расчёте нестационарного течения газа в коленах дало удовлетворительное согласование с экспериментом.

6. Доказана применимость коэффициентов местного сопротивления для стационарного потока при расчёте нестационарного течения методом распада разрыва, основанная на том, что в методе выделяются такие зоны в непосредственной близости от местного сопротивления, течение в которых можно принимать стационарным на расчётном интервале времени.

7. Сопоставление экспериментальных данных и результатов расчёта течения газа из цилиндра в выпускной трубопровод одноцилиндрового двигателя ЧН13/14 показало:

перетекание газа через местное сопротивление типа "демпфер" (клапанная щель, переходник выпускного канала, сопловое отверстие) рассчитывается с удовлетворительной точностью в диапазоне изменения диаметра "демпфера" от нуля до диаметра тру-

бопровода;

импульс давления в трубопроводе, полученный в расчёте, совпадает с импульсом, определённым экспериментально, с точностью 3-5%;

задача о цилиндре решается в одномерной постановке с высокой точностью, но с повышенными затратами машинного времени.

8. Расчётным способом исследовано взаимное влияние истечения газов из двух цилиндров двигателя 12ЧН21/21, с выпуском в разделённые коллекторы, имеющие общий выход на турбину через разветвление (преобразователь импульсов).

Применение метода распада разрыва и разработанных внутренних граничных условий может быть рекомендовано для расчёта перспективных схем газовоздушных трактов ДВС, таких как выпускная система с преобразователем импульсов, система "Компрекс" и др.

По материалам диссертации опубликовано:

1. Круглов М.Г., Яушев И.К., Гусев А.В. Метод распад разрыва в применении к расчёту газовоздушного тракта ДВС. - Двигателестроение, 1980, № 8, с.19-21.

2. Круглов М.Г., Гусев А.В. Расчёт параметров отработавших газов в системе цилиндр-трубопровод одноцилиндрового двигателя. - Двигателестроение, 1980, № 11, с.19-20.

3. Гусев А.В., Круглов М.Г. Определение параметров нестационарного потока в системе цилиндр-трубопровод методом распада разрыва. - Тезисы докладов Всесоюзной научн.-техн. конференции. Перспективы развития КДВС и двигателей новых схем и топлив. - М.: МВТУ, 1980, с.35.

4. Гришин Ю.А., Гусев А.В., Круглов М.Г. Методы расчёта разветвлённых систем газообмена ДВС. - Двигателестроение, 1981, № 1, с.10-12.