М376117

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ СССР

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

На правах рукописи

РУДОЙ БОРИС ПЕТРОВИЧ

ВЛИЯНИЕ НА ГАЗООБМЕН НЕУСТАНОВИВШИХСЯ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ГАЗОВОЗДУШНОМ ТРАКТЕ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Специальность 05.04.02—«Тепловые двигатели»

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Москва—1981

Работа выполнена в Уфимском авиационном институте им. Орджоникидзе.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор **Дьяченко В. Г.**,
доктор технических наук, профессор **Толшин В. И.**,
доктор технических наук, профессор **Роганов С. Г.**

Ведущее предприятие: НАМИ (г. Москва).

Защита состоится «____» _____ 198__г. на заседании специализированного совета Д 053.15.10 по тепловым и гидравлическим машинам при Московском высшем техническом училище им. Н. Э. Баумана по адресу: Москва, Лефортовская набережная, д. 1, факультет «Энергомашиностроение».

С диссертацией можно оз

Отзыв на автореферат н
печатью, просьба присылать
манская ул., д. 5, МВТУ им.

Автореферат разослан «_

М376117

Ученый секретарь
специализированного совета

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Двигатели внутреннего сгорания занимают видное место в энергетике страны и являются важным фактором в повышении эффективности экономики нашего государства.

Это обусловлено масштабами использования ДВС в народном хозяйстве. Так суммарная мощность действующего парка двигателей в несколько раз превышает мощность всех электростанций страны. На производство двигателей внутреннего сгорания расходуется значительная часть металла, производимого металлургической промышленностью. В эксплуатации используется большая доля добываемой в стране нефти.

Все это выдвигает ряд актуальных задач дальнейшего ускорения научно-технического прогресса в моторостроении и эксплуатации моторной техники: повышение топливной экономичности выпускаемых двигателей, увеличение надежности и моторесурса, уменьшение металлоемкости.

Важным средством решения этих задач является увеличение расхода воздуха через двигатель при сохранении его рабочего объема. Поэтому разработка методов увеличения расхода воздуха через двигатель внутреннего сгорания является одной из важнейших проблем двигателестроения.

Актуальность темы обусловлена:

- необходимостью и своевременностью решения комплекса задач, обеспечивающих реализацию основных указаний директивных органов государства, направленных на повышение качества и надежности двигателей (решения XXУ съезда КПСС; декабрьского (1977 год) Пленума ЦК КПСС; решения, принятого ЦК КПСС по итогам совещания, проведенном в Центральном Комитете в марте 1978 года с участием руководителей министерств и ведомств, генеральных и главных конструкторов, директоров научно-исследовательских институтов, производственных объединений и предприятий машиностроения, а также руководителей химической, нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности, сельского хозяйства, железнодорожного и автомобильного транспорта, морского, рыбопромыслового и речного флотов);

1376117

НТБ МГТУ им. Н.Э.Баумана
1376117
Рудой Б.П. Влияние на газоо

- неудовлетворительным состоянием теоретической базы, являющейся основой для развертывания работ по увеличению расхода воздуха через двигатель, в части обоснования возможностей использования неустановившихся газодинамических процессов в газовоздушных трактах двигателей внутреннего сгорания.

Целью исследования являлось:

обобщение накопленного экспериментального и теоретического опыта в области газообмена для установления влияния неустановившихся газодинамических процессов в газовоздушных трактах двигателей внутреннего сгорания, включая комбинированные, на основные показатели газообмена и разработки рекомендаций по их использованию в ДВС.

Основными научными результатами являются сформулированные и обоснованные научные положения, позволившие разработать теорию неустановившихся газодинамических процессов в газовоздушных трактах ДВС, которая базируется на физическом и математическом описании объекта, обосновывается экспериментальными исследованиями и является основой для разработки эффективных методов улучшения газообмена современных ДВС.

Научные результаты, вытекающие из этой теории, формулируются следующим образом:

- получена математическая модель процесса газообмена ДВС, в основу которой положена задача о распаде произвольного разрыва, что обеспечивает выполнение основных законов сохранения при расчете;
- разработан приближенный метод расчета наполнения и опорожнения сосуда через трубопровод конечной длины, обеспечивающий в рамках одномерной модели выполнение всех основных законов сохранения;
- установлен механизм газодинамических процессов в газовоздушных трактах двигателей внутреннего сгорания;
- выявлены, качественно и количественно оценены факторы, воздействующие на коэффициент наполнения;
- установлена предельная величина коэффициента наполнения четырехтактных двигателей, позволяющая оценить степень совершенства газовоздушных трактов двигателей как созданных, так и вновь проектируемых;

- доказано существование оптимальной (обеспечивающей наибольший коэффициент наполнения) схемы газовоздушных трактов ДВС;
- показано, что оптимальная схема ГВТ обеспечивает и наилучшее использование энергии выпускных газов;
- обоснована возможность управления расходом воздуха по скоростной характеристике двигателя за счет или пассивной настройки газовоздушного тракта, или активного воздействия на основные его параметры; предложены конструктивные мероприятия по их практической реализации.

Научная ценность работы состоит в том, что созданная теория неустановившихся газодинамических процессов в газовоздушных трактах ДВС позволила с высокой степенью достоверности описать процессы, происходящие в двигателях, получить новые знания об их природе и послужила объективной основой для разработки мероприятий по оптимизации газообмена в ДВС.

Практическая ценность полученных результатов и рекомендаций заключается в том, что внедрение их в практику позволит создавать на научной основе двигатели с более совершенными газовоздушными трактами и сократит сроки их экспериментальной доводки. Это приведет к снижению затрат на проектирование, производство и эксплуатацию двигателей внутреннего сгорания.

Практическая ценность предлагаемых методов расчета и рекомендаций подтверждается разработкой под руководством и непосредственном участии автора газовоздушных трактов двигателей УМЗ-6, М-412НВ, "Буран", существенно улучшивших их показатели.

Результаты исследования внедрены в учебный процесс для студентов специальности 0523 в курсах "Гидрогазодинамика" и "Теория рабочих процессов ДВС".

Новизна научных и практических результатов определяется:
- впервые выдвинутыми положениями, объясняющими природу газодинамических эффектов в газовоздушных трактах ДВС;
- впервые разработанными методами использования волновых процессов в ГВТ ДВС, для управления внешней характеристикой двигателей и использования энергии выпускных газов, защищенными четырьмя авторскими свидетельствами, исполь-

зованием методов в практике и публикациями.

Апробация работы. Изложенный в диссертации материал докладывался на:

I. Всесоюзном семинаре по ДВС при МВТУ им.Баумана (I969; I972, I977 г.г.).

2. Всесоюзной конференции "Пути повышения мощности, надежности и долговечности двигателей внутреннего сгорания" (Москва, I973 г.).

3. Всесоюзном семинаре по аналитическим методам в газовой динамике (рук. ак. Яненко Н.Н., Уфа, I977г.).

4. Всесоюзном семинаре "Использование математического моделирования и ЭВМ" в исследовании процессов рабочего цикла ДВС" (Челябинск, I977г.).

5. Всесоюзной школе-семинаре "Газодинамика и теплообмен в энергетических установках" (Минск, I979г.).

6. Всесоюзной научно-технической конференции "Проблемы создания и использования двигателей с высоким наддувом" (Харьков, I979г.).

7. Ежегодных научно-технических конференциях Уфимского авиационного института (I966-I979г.г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 46 печатных работ, из них 3 авторских свидетельства и 3 учебных пособия.

Объем работы. Диссертация состоит из введения и семи глав, изложенных на 318 страницах машинописного текста, в которые включены I7 таблиц и 94 рисунка. В списке литературных источников указано 263 названия на 30 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении проведен анализ состояния теории газообмена двигателей внутреннего сгорания, определена проблема и цели проведения комплекса исследований. Совершенствование показателей двигателей внутреннего сгорания в значительной мере зависит от разработки методов увеличения расхода воздуха, не связанных с увеличением рабочего объема. На современном этапе развития двигателей в основном используется метод наддува, обеспечивающий повышенный расход воздуха за счет увеличения его плотности при сжатии в компрессоре и последующем охлаждении в холодильнике. Однако этот метод оказывается малоэффектив-

ным в двигателях с малым рабочим объемом и в бензиновых двигателях. С конца прошлого века известен эффект увеличения расхода воздуха при подборе размеров впускного и выпускного трактов двигателя. Как показывает опыт создания гоночных двигателей и ряд экспериментальных исследований, рациональное использование этого эффекта позволяет существенно (на 50% и более) увеличить расход воздуха через их рабочие камеры, но до настоящего времени этот метод не получил широкого практического применения. Это обусловлено недостаточным знанием механизма неустановившихся газодинамических процессов в газовоздушных трактах ДВС. Широко используемая в практике проектирования квазистационарная модель газообмена, в разработку которой большой вклад внесли Б.С.Стечкин, М.М.Масленников, А.С.Орлин, И.М.Глаголев, М.Г.Круглов, А.Э.Симсон, М.С.Ховах, М.С.Ханин, не позволяет учесть влияние неустановившихся процессов в газовоздушном тракте на расход воздуха. Поэтому в настоящее время интенсивно разрабатываются расчетные методы, учитывающие нестационарный характер движения газа в ГВТ ДВС. Здесь следует отметить работы Е.Джени, Р.Бенсона, М.Г.Круглова, Д.А.Мунштукова, Б.А.Киселева, В.Г.Дьяченко, О.Г.Красовского, С.В.Камкина, Р.Р.Сиддата, Г.Зейферта. Однако основные усилия в этих исследованиях направлены на разработку метода расчета, а не на выяснение принципиальных возможностей использования неустановившихся процессов в газовоздушном тракте двигателя на увеличение расхода воздуха через него. В связи с этим основная научная проблема современного этапа развития теории газообмена ДВС заключается в установлении влияния неустановившихся газодинамических процессов в газовоздушном тракте двигателя на расход воздуха через него и в разработке методов их практического использования.

Решению этой проблемы посвящена диссертация.

В первой главе изложена математическая модель процесса газообмена двигателя внутреннего сгорания. При разработке математической модели были приняты традиционные допущения:

1. Рабочее тело является идеальным (не вязким) газом.

2. Течение газа в газовоздушном тракте двигателя одномерное.

3. В рабочей камере и ресиверах давление мгновенно выравнивается по всему объему.

На значительных участках газовоздушного тракта двигателя

течение газа может рассматриваться как одномерное. Эти участки сопрягаются через участки, в которых течение является существенно неодномерным и характеризуется большими продольными градиентами параметров (дроссели, диафрагмы, органы газораспределения, разветвления, скачки сечения и т.д.). Это указывает на то, что общая одномерная математическая модель движения газа в конкретном ГВТ двигателя должна включать в качестве составных частей математические модели движения газа на гладких (без разрывов) участках ГВТ и математические модели движения газа на "разрывах" - участках с большими продольными градиентами параметров.

Для расчета гладких одномерных нестационарных движений газа использованы дифференциальные уравнения в частных производных, выражающие основные законы сохранения массы, количества движения, энергии:

$$\frac{\partial \ln p}{\partial t} + u\frac{\partial \ln p}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial x} = 0, \qquad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u\frac{\partial u}{\partial x} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x} - f_T, \qquad (2)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + u\frac{\partial S}{\partial x} = \frac{1}{T}\left(\frac{\partial Q}{\partial t} + u\frac{\partial Q}{\partial x}\right) \qquad (3)$$

и уравнение состояния

$$\frac{p}{p_0} = \left(\frac{T}{T_0}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \cdot e^{-\frac{S-S_0}{R}}. \qquad (4)$$

В данной работе используется характеристическая форма уравнений (1) ... (3):

$$\frac{dx}{dt} = u+a, \quad \frac{\delta J_+}{\delta t} = \frac{a^2}{\kappa R}\frac{\partial S}{\partial x} + \frac{a}{R}\left(\frac{\partial S}{\partial t} + u\frac{\partial S}{\partial x}\right) - f_T, \qquad (5)$$

$$\frac{dx}{dt} = u-a, \quad \frac{\delta J_-}{\delta t} = -\frac{a^2}{\kappa R}\frac{\partial S}{\partial x} + \frac{a}{R}\left(\frac{\partial S}{\partial t} + u\frac{\partial S}{\partial x}\right) + f_T, \qquad (6)$$

$$\frac{dx}{dt} = u, \quad \frac{\mathcal{D}S}{\mathcal{D}t} = \frac{1}{T}\left(\frac{\partial q}{\partial t} + u\frac{\partial q}{\partial x}\right), \qquad (7)$$

где: u – скорость потока;
a – скорость звука;
S – удельная энтропия;
R – газовая постоянная;
f_r – сила трения;
q – удельный тепловой поток;
κ – показатель адиабаты;

$J_+ = \frac{2}{\kappa-1}a + u$, $J_- = \frac{2}{\kappa-1}a - u$ – инварианты Римана

Для создания методики расчета течения газа на "разрывах" использована р шенная академиком Кочиным Н.Е. задача о распаде произвольного разрыва в канале постоянного сечения. В 1968г. автором была предложена методика расчета течения газа через впускные и выпускные органы двигателя, основанной на этой задаче. Ее особенность заключается в том, что вместо распределения давления по поверхности разрывного участка, необходимого для составления уравнения импульсов, которое в большинстве случаев может быть определено в результате трудоемких экспериментов, используется коэффициент восстановления давления σ, однозначно связанный в адиабатных процессах с ростом энтропии. Для первого приближения можно принимать его значения, полученные путем стационарных продувок. В дальнейшем можно вводить корректировки на нестационарность процесса, принимая во внимание, что при нестационарном движении газа рост энтропии выше, чем при стационарном.

Подавляющее большинство конструктивных участков ГВТ ДВС, на которых наблюдаются значительные градиенты параметров, можно представить как разрыв типа "диафрагма" (рис.1).



Рис. I

Математическая модель взаимодействия волн с диафрагмой имеет следующий вид:

$$
\left.
\begin{aligned}
&\left(\frac{\mathcal{J}_{+6}}{\mathcal{J}_{-1}}\right)^{\frac{2k}{k-1}} \cdot e^{\frac{S_1 - S_6}{R}} = \frac{\pi'(M_2)}{\pi''(M_5)} \cdot \frac{\pi(M_4)}{\pi(M_д)} \cdot \frac{\sigma_{д4}}{\sigma_{з д}} \cdot \frac{\pi(M_д)}{\pi(M_3)} \cdot \frac{\sigma_{4д}}{\sigma_{д3}} ,\\
&q(M_4)\frac{F_4}{F_д}\sigma_{д4} = q(M_д)\,\sigma_{4д} ,\\
&q(M_3)\frac{F_3}{F_д}\sigma_{д3} = q(M_д)\,\sigma_{3д} ,\\
&\mathcal{J}_{+6}\alpha''(M_5)M_5 M_3\sqrt{\frac{\tau(M_3)}{\tau(M_4)}} = \mathcal{J}_{-1}\alpha'(M_2)M_2 M_4 ,\\
&\text{При } M_д \geqslant 0: \qquad \text{При } M_д < 0:\\
&\quad M_5 = M_4, \qquad\qquad M_2 = M_3;\\
&\quad \sigma_{д4} = 1, \qquad\qquad \sigma_{д3} = 1,\\
&\quad \sigma_{3д} = 1. \qquad\qquad \sigma_{4д} = 1.
\end{aligned}
\right\} \quad (8)
$$

Здесь: M – число Маха;

$\pi(M), \pi''(M), \alpha'(M), \alpha''(M)$ – газодинамические функции для одномерных изэнтропических нестационарных течений газа (разработанные автором при участии Гришина Ю.А.);

F – площадь сечения.

Индексы 1, 2, 3, 4, 5, 6 – зоны течения газа (см. рис. 1),

$д$ – сечение диафрагмы

Из данной модели получается ряд математических моделей частных случаев.

Если площадь отверстия диафрагмы равна площади узкого трубопровода, то получим вариант взаимодействия волн на стыке двух каналов с различными площадями сечения. В случае равенства площадей каналов и отсутствия потерь ($\sigma_{4д} = 1$, $\sigma_{д4} = 1$, $\sigma_{3д} = 1$, $\sigma_{д3} = 1$) имеем течение газа в гладком трубопроводе. Если же потери имеют место (помимо трения), например, при повороте канала, то это учитывается соответствующим коэффициентом восстановления давления. При бесконечной площади поперечного сечения широкого канала имеем взаимодей-

ствие волны с открытым концом трубопровода.

При расчете гладких каналов с изменяющейся площадью поперечного сечения по длине он заменяется ступенчатым каналом, на стыках которого потери равны нулю.

Таким образом, задавая соответствующие признаки сечения, в котором происходит взаимодействие волн, можно учесть практически все, представляющие интерес, конструктивные особенности неразветвленного газовоздушного тракта двигателя. Таких признаков семь: три характерные площади сечения $F_з$, $F_ч$, $F_в$ и четыре коэффициента давления – $\sigma_{зд}$ и $\sigma_{дч}$ для течения из широкого канала в узкий, а $\sigma_{зд}$ и $\sigma_{дз}$ для течения из узкого канала в широкий (рис. I).

Инварианты Римана γ_{+6} и γ_{-1} определяются на основании решения системы (5) ... (7) с использованием (4). Для расчетов течений в ГВТ ДВС используется численный метод характеристик с фиксированным шагом по времени и длине. Плоскость x, t делится на ячейки, как показано на рис.2а. Каждая граница ячейки по длине характеризуется указанными выше семью признаками (границы ячеек выбираются в характерных сечениях канала по длине, если имеют место местные сопротивления).

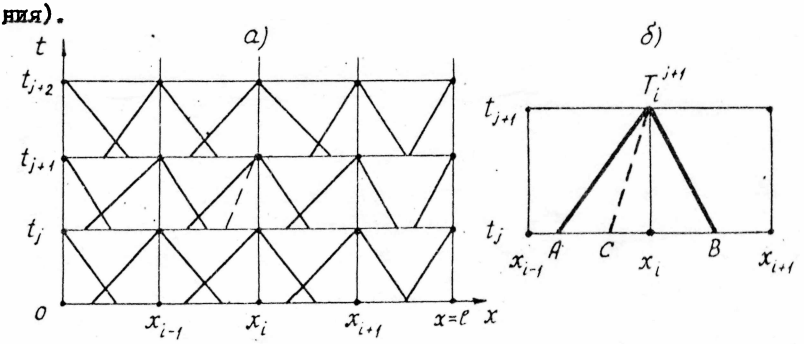


Рис. 2

Определение параметров в точке T_i^{j+1} ведется методом последовательных приближений. Для первого приближения полагаем, что в ячейке справа (рис.2б) от сечения x_i инварианты $\vec{\gamma}_+$, $\vec{\gamma}_-$ постоянны и равны соответственно $\vec{\gamma}^{j}_{+i}$; $\vec{\gamma}^{j}_{-i}$, а справа – $\vec{\gamma}^{j}_{+i}$ и $\vec{\gamma}^{j}_{-i}$. Тогда параметры в точках А и В находим из уравнений:

$$a_A = \frac{\vec{J}_{+i}^{\,j} + \vec{J}_{-i}^{\,j}}{4}\,\frac{\kappa-1}{}, \qquad a_B = \frac{\overleftarrow{J}_{+i}^{\,j} + \overleftarrow{J}_{-i}^{\,j}}{4}\,\frac{\kappa-1}{},$$

$$u_A = \frac{\vec{J}_{+i}^{\,j} - \vec{J}_{-i}^{\,j}}{2}, \qquad u_B = \frac{\overleftarrow{J}_{+i} - \overleftarrow{J}_{-i}^{\,j}}{2}, \qquad (9)$$

а их координаты из уравнений

$$x_A = x_i - (u_A + a_A)\,\Delta t,$$
$$x_B = x_i - (u_B - a_B)\,\Delta t, \qquad (10)$$
$$x_C = x_i - u_A\,\Delta t \quad или \quad x_C = x_i - u_B\,\Delta t.$$

Инварианты Римана и энтропия в точках A, B и C определяются методом линейной интерполяции. Далее вычисляются субстанциональная производная энтропии и величина энтропии в точке T_i^{j+1}:

$$\vec{S}_i^{\,j+1} = S_C + \frac{\mathcal{D}S}{\mathcal{D}t}\,\Delta t,$$
$$\frac{\mathcal{D}S}{\mathcal{D}t} = \frac{\kappa R}{a^2 d}\left[\lambda\frac{|u^3|}{2} + \frac{4\alpha}{\rho}(T_C - T_T)\right], \qquad (11)$$

где λ – коэффициент потерь на трение;
α – коэффициент теплоотдачи;
T_C – температура газа в точке C;
T_T – температура внутренней поверхности канала;
ρ – плотность.

Это позволяет определить инварианты Римана в T_i^{j+1}

$$\vec{J}_{+i}^{\,j+1} = J_A + \frac{a}{\kappa R}\left[(\kappa-1)\frac{\mathcal{D}S}{\mathcal{D}t}(t^{j+1} - t^j) + (\vec{S}_i^{\,j+1} - S_A)\right] - f_T(t^{j+1} - t^j),$$

$$\overleftarrow{J}_{-i}^{\,j+1} = J_B + \frac{a}{\kappa R}\left[(\kappa-1)\frac{\mathcal{D}S}{\mathcal{D}t}(t^{j+1} - t^j) + (\vec{S}_i^{\,j+1} - S_B)\right] + f_T(t^{j+1} - t^j) \qquad (12)$$

Зная инварианты прибывающих к сечению характеристик $\overleftarrow{J}_{-i}^{\,j+1}$ $\vec{J}_{+i}^{\,j+1}$, а так же энтропию $\vec{S}_i^{\,j+1}$, используя систему (8),

находим параметры потока первого приближения до сечения и за сечением, а по ним инварианты Римана слева $\tilde{J}_{i-1}^{j+1}$ и справа $\tilde{J}_{i+1}^{j+1}$, $\tilde{S}_{i}^{j+1}$ от сечения. Для последующих приближений u и α полагаются равными средним арифметическим между точками T_i^{j+1} и A, T_i^{j+1} и B, T_i^{j+1} и C.

Расчет параметров на внешних (по отношению к рассчитываемому каналу) граничных сечениях обладает рядом специфических особенностей, которые определяются видом граничных условий. В ДВС можно выделить четыре вида внешних граничных условий: 1) закрытый конец трубопровода; 2) открытый конец трубопровода; 3) турбина (или компрессор); 4) стык канала с сосудом малого объема (рабочей камерой или ресивером). В работе рассмотрены все виды граничных условий. Показано, совместно с Гришиным Ю.А., что интенсивность отраженных волн от турбины зависит от работы турбины. Разработан метод расчета отражения волн от осевой турбины.

Особое место в математической модели газообмена двигателя занимает модель течения газа на стыке сосуда малого объема и трубопровода. Это связано с тем, что рабочая камера двигателя как раз является сосудом малого объема, а процессы ее наполнения и опорожнения во многом определяют характеристики двигателя.

В существующих моделях не учитывается работа, совершаемая фронтом вытекающего (втекающего) газа. Это приводит к нарушению закона сохранения энергии при расчетах наполнения или опорожнения емкости. Автором разработана модель, позволяющая в рамках традиционного допущения о мгновенности выравнивания давления в рабочей камере или ресивере обеспечить выполнение закона сохранения энергии на каждом расчетном шаге.

При наполнении параметры в граничном сечении и сосуде определяются из решения системы уравнений:

$$\left.\begin{aligned}
&\frac{P_т}{P_р} = \frac{\pi^{*}(M_т)}{\pi^{*}(M_в)} \cdot \frac{F_к}{F_т} \cdot \frac{y(M_к)}{y(M_в)} \cdot \frac{P_к}{P_р} \\
&\sigma_{тк}\, q(M_к) F_к = q(M_в) F_т , \\
&\Delta E = \rho_т^{o} a_т^{o} F_т T_т^{o} \left\{ \frac{R}{K-1}\left[1 - \tau^{*}(M_в)\right] - \frac{KR}{2}\left[M_в\, \alpha^{*}(M_в)\right]^2 \right\} \Delta t , \\
&\Delta T = \frac{\Delta E}{G_р c_v} , \\
&P_р = P_{рц} \left(\frac{T_{рц} + \Delta T}{T_{рц}} \right)^{\frac{K}{K-1}} ,
\end{aligned}\right\} \quad (13)$$

где: ΔE – энергия, передаваемая в рабочую камеру за счет нестационарности процесса;

G_p – масса газа в рабочей камере.

индексы: $г$ – в газе перед фронтом волны;

$в$ – в волне;

$к$ – в сечении впускного органа;

$р$ – в рабочей камере или ресивере;

$и$ – исходные параметры на расчетном шаге;

$^{\circ}$ – параметры нестационарно заторможенного потока.

При опорожнении рабочей камеры или ресивера следует решать систему уравнений:

$$\left.\begin{aligned}
&\frac{\rho_р}{\rho_г} = \frac{1}{\pi(M_к)} \cdot \frac{F_г}{F_к} \cdot \frac{y(M_г)}{y(M_к)} \cdot \frac{\pi'(M_в)}{\pi'(M_г)},\\
&q(M_г) = q(M_к)\,\frac{F_к}{F_г}\,\frac{1}{\sigma_{кг}},\\
&M_в = \frac{1}{\frac{a_г^{\circ}}{a_г^{*} M_г \alpha(M_г)} + \frac{к-1}{2}},\\
&\Delta E_в = \rho_г^{\circ} a_г^{\circ} F_г T_г^{*}\left\{\frac{R}{к-1}\left[\tau'(M_в)-1\right] + \frac{кR}{2}\left[M_в \alpha'(M_в)\right]\right\}\Delta t,\\
&T_р = \frac{E_{ри} - \Delta E_в}{\frac{R}{к-1} G_р},\\
&\rho_р = \rho_{ри}\left(\frac{T_р}{T_{ри}}\right)^{\frac{к}{к-1}}.
\end{aligned}\right\} \quad (14)$$

Во второй главе приведены результаты оценки достоверности математической модели наполнения и опорожнения рабочей камеры двигателя.

Так как при разработке математической модели был сделан ряд допущений, необходима оценка влияния их на конечный результат. Наиболее существенно допущение об одномерности процесса газообмена. Это привело к необходимости вводить в модель опытные коэффициенты сужения струи ε и восстановления давления σ. Допущение об отсутствии вязкости требует знания коэффициента потерь на трение λ. Процесс газообмена сопровождается теплообменом, который в большой мере зависит от

местных значений коэффициента теплоотдачи α . В настоящее время отсутствуют достаточно надежные данные по перечисленным выше коэффициентам для двигателей. Поэтому проверка математической модели и граничных условий осуществлялась на задачах с известными аналитическими решениями и на результатах экспериментов, полученных на специально разработанной одноцикловой установке. Ее узел клапана позволял принять достаточно достоверные значения коэффициентов сужения струи и восстановления давления. Выбор температуры рабочего тела в экспериментальной установке, равной температуре окружающей среды, позволил пренебречь процессом теплообмена (влияние его на давление значительно меньше I%). Так как трение исключить из рассмотрения невозможно, автором была разработана методика определения потерь на трение в волне конечной амплитуды и совместно с Березиным С.Р. определен коэффициент потерь на трение в зависимости от числа Re для условий экспериментальной установки. Он же использовался и для расчета течения газа в газовоздушных трактах двигателей. После этого была осуществлена проверка основных граничных условий: отражение волн от открытого конца трубопровода (при участии Виноградова В.В. и Гришина Ю.А.), от осевой турбины (совместно с Гришиным Ю.А.). Эти два этапа позволили перейти к оценке достоверности определения параметров наполнения и опорожнения рабочей камеры установки с различными впускными и выпускными каналами (рис.3, 4). Сравнивались параметры (давление и температура), рассчитанные по разработанной математической модели, с известным решением наполнения вакуумированной емкости. Все результаты показали высокую степень достоверности расчета (коэффициент согласования кривых давления достигал 0,96 и более). После этого рассчитывался весь рабочий процесс двигателя М-412. Чтобы максимально избежать влияния на оценку математической модели процессов теплообмена и сгорания, сравнение расчетных данных производилось с экспериментальными данными, полученными при холодной прокрутке. Согласование расчетных и экспериментальных кривых также находилось на уровне 0,95 - 0,96 (рис. 5, 6). Эти результаты показали высокую степень достоверности математической модели даже в одномерной постановке, что позволило использовать ее как инструмент для анализа процесса газообмена ДВС и ответа на поставленные задачи данной работы.

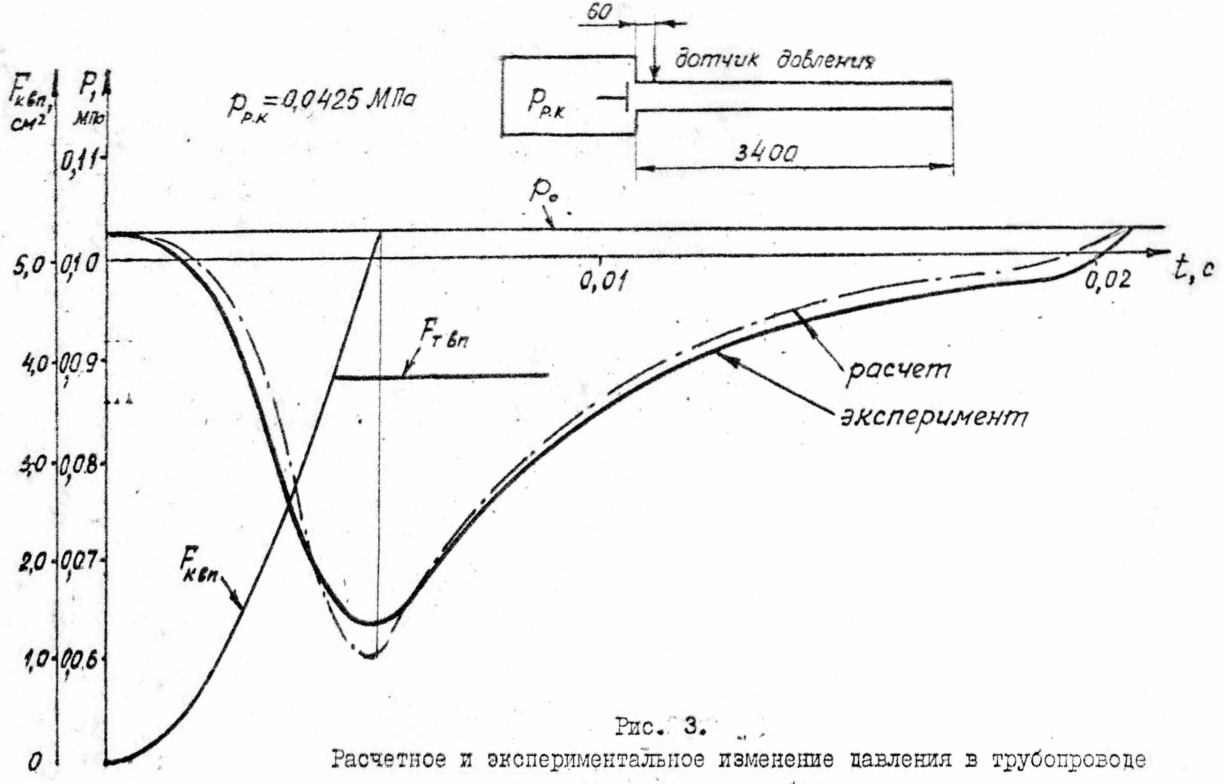


Рис. 3.
Расчетное и экспериментальное изменение давления в трубопроводе при впуске воздуха в рабочую камеру

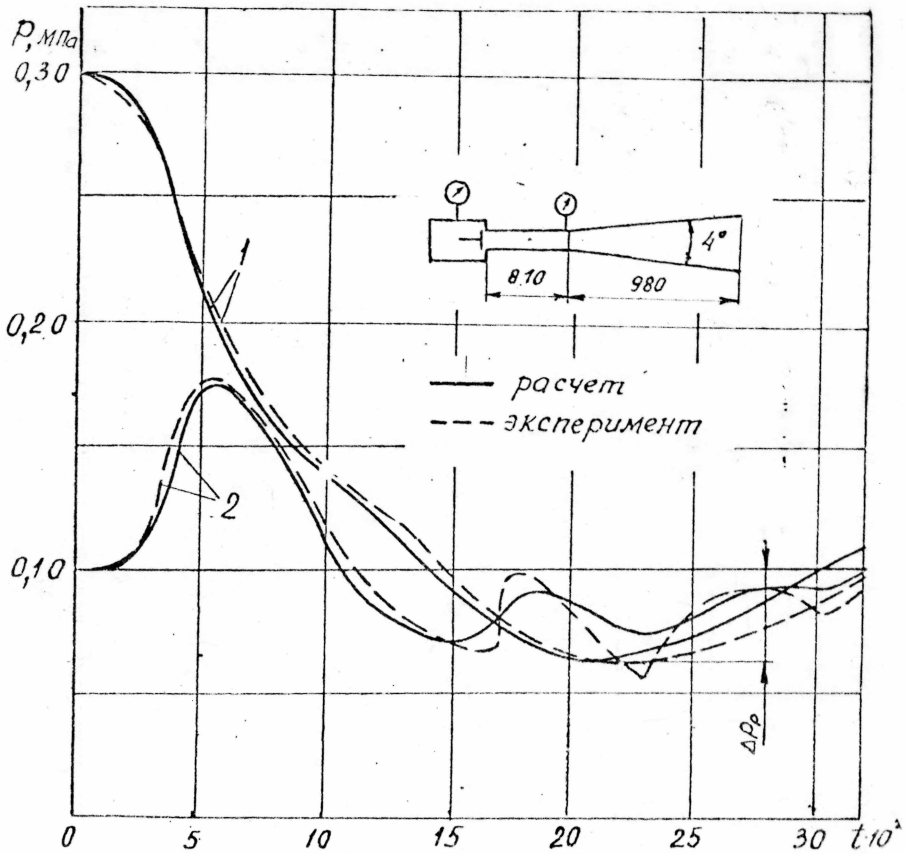


Рис. 4.

Расчетное и экспериментальное изменение давления в трубопроводе с коническим участком при выпуске воздуха из рабочей камеры

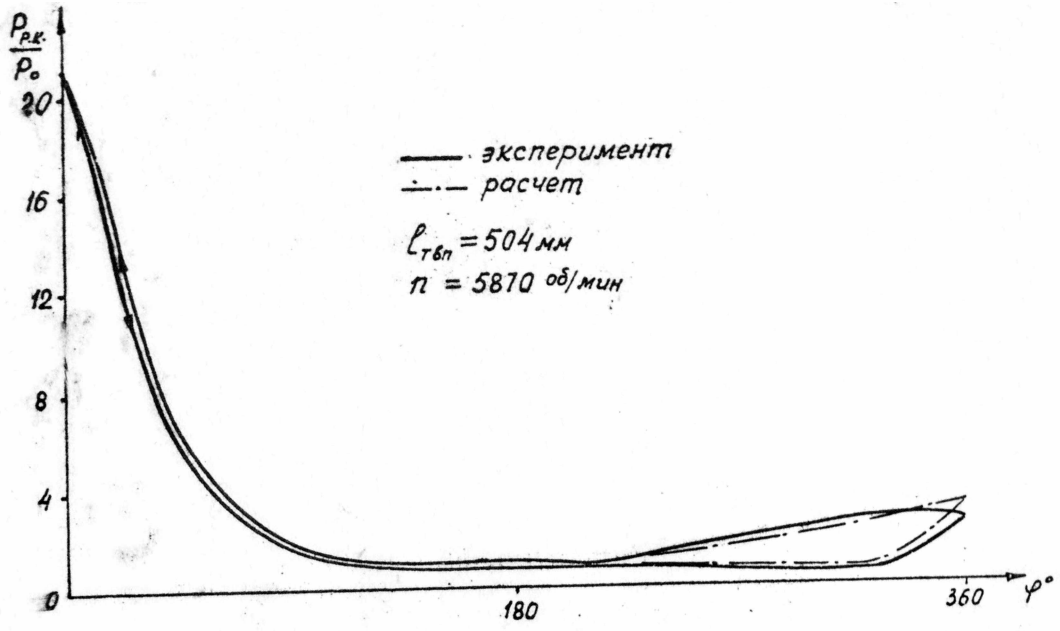


Рис. 5.

Изменение давления в рабочей камере двигателя М-4I2 при холодной прокрутке

М376117

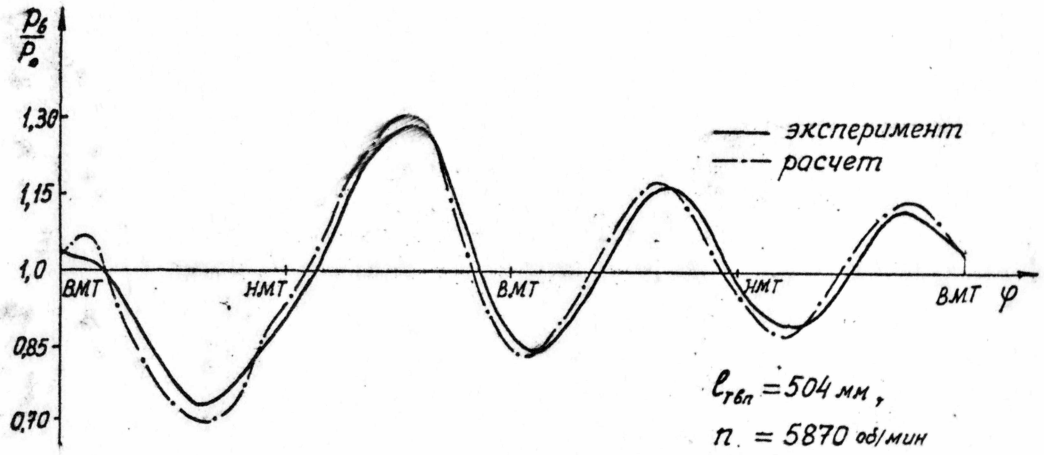


Рис. 6.

Изменение давления во впускном канале двигателя М-412 при холодной прокрутке

МВТУ им. Н.Э. Баумана БИБЛИОТЕКА

В третьей главе изложены результаты анализа механизма газодинамических явлений в газовоздушном тракте двигателя. Показано, что влияние размеров газовоздушного тракта двигателя обусловлено движением уединенной волны конечной амплитуды на первой оптимальной длине. На второй и третьей оптимальных длинах - приходом остаточной уединенной волны к следующему циклу (после пяти и трех отражений от открытого конца). На четвертом (и последующих) - уединенной волной от предыдущего цикла (от предыдущих циклов) и остаточными волнами от предыдущих циклов.

Определена величина максимально возможного полного давления у впускных органов

$$p_{кп} = p_0 \left(\frac{\kappa+1}{2}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \qquad (15)$$

и минимального давления за выпускными органами

$$p'_{кп} = p_0 \left(\frac{3-\kappa}{2}\right)^{\frac{2\kappa}{\kappa-1}} \qquad (16)$$

для каналов постоянного поперечного сечения по длине.

Эти величины подтверждаются экспериментами.

Произведена оценка степени подогрева воздуха на впуске от работы впуска и влияния на него нестационарных процессов во впускном трубопроводе.

Уточнено определение коэффициента наполнения.

В четвертой главе рассматривается влияние отдельных конструктивных размеров газовоздушного тракта двигателя на газообмен. Анализ газовоздушных трактов современных ДВС показал, что в них можно выделить основную часть (основной ГВТ), включающую в себя элементы, которые есть в любом двигателе внутреннего сгорания, и дополнительную, включающую элементы, не связанные с организацией процесса газообмена (но влияющие на него) и предназначенные для решения иных задач, например, улучшение гигиенических свойств двигателя (глушитель) или увеличение его долговечности (фильтр) и т.д.

В главе обсуждается влияние параметров основного ГВТ, которых в четырехтактном двигателе десять: 1) закон изменения площади поперечного сечения впускного канала по длине; 2) длина впускного канала; 3) фаза открытия впускного органа;

4) закон открытия впускного органа; 5) фаза закрытия впускного органа; 6) закон изменения площади поперечного сечения выпускного канала по длине; 7) длина выпускного канала; 8) фаза открытия выпускного органа; 9) закон открытия выпускного органа; I0) фаза закрытия выпускного органа.

В процессе анализа выяснена природа "мегафонного эффекта", показана взаимосвязь перечисленных параметров и необходимость их согласования при настройке газовоздушного тракта двигателя.

В пятой главе дается обоснование оптимальной (обеспечивающей наибольший коэффициент наполнения)схемы газовоздушного тракта двигателя.

Методом"численного эксперимента" установлена максимально возможная величина коэффициента наполнения

$$\eta_v^* = 1{,}33\frac{\varepsilon}{\varepsilon-1} \qquad (17)$$

для двигателя с одной рабочей камерой. Показано, что эта величина соответствует случаю, когда впускные и выпускные трубопровода граничат с ресивером бесконечно большого объема (окружающей средой), что обеспечивает наилучшее отражение волн от открытого конца трубопровода. При необходимости устанавливать дополнительные элементы в ГВТ они должны быть отделены от основных элементов ресивером достаточного объема ($>3V_h$).

С целью выяснения возможности использования волн, возбуждаемых в соседних рабочих камерах многокамерного ДВС, для увеличения коэффициента наполнения по сравнению с однокамерным двигателем на базе задачи о распаде произвольного разрыва была составлена и проанализирована математическая модель взаимодействия волн с разветвлениями. Для приточного тройника (с двумя контактными поверхностями) (рис.7а) основная система уравнений имеет вид:

$$\left.\begin{aligned}\frac{p_5}{p_1} &= \frac{\pi''(M_5)}{\pi''(M_4)}\cdot\frac{\pi(M_4)}{\sigma_{43}\,\pi(M_3)}\cdot\frac{\pi'(M_2)}{\pi'(M_1)},\\ \frac{p_5}{p_1'} &= \frac{\pi''(M_5)}{\pi''(M_4)}\cdot\frac{\pi(M_4)}{\sigma_{43'}\,\pi(M_3')}\cdot\frac{\pi'(M_2')}{\pi'(M_1')},\end{aligned}\right\} \qquad (18)$$

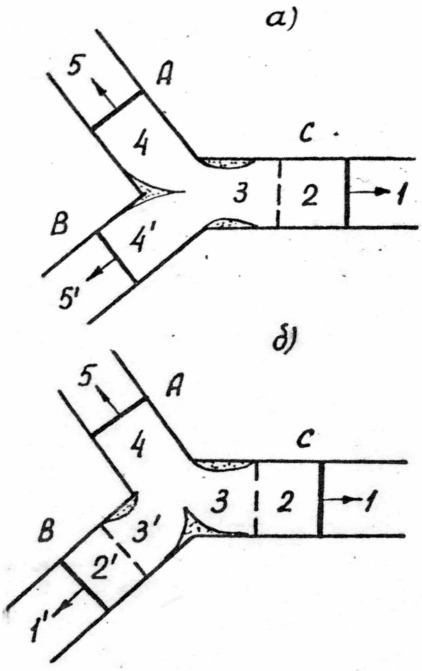


Рис. 7

Нестационарное течение газа в разветвлении
а) приточный тройник;
б) вытяжной тройник

$$
\left.
\begin{aligned}
& q(M_4) F_A = q(M_3) F_c \sigma_{43} + q(M_3') \sigma_{43'} F_B , \\
& M_3 a_5 \frac{\alpha''(M_4)}{\alpha''(M_5)} \sqrt{\frac{\tau(M_3)}{\tau(M_4)}} = a_1 \frac{\alpha'(M_2)}{\alpha'(M_1)} , \\
& M_3' a_5 \frac{\alpha''(M_4)}{\alpha''(M_5)} \sqrt{\frac{\tau(M_3')}{\tau(M_4)}} = a_1' \frac{\alpha'(M_2')}{\alpha'(M_1')} .
\end{aligned}
\right\} \qquad (18)
$$

А для вытяжного тройника (с одной контактной поверхностью) (рис.7б):

$$
\left.
\begin{aligned}
& \frac{p_5}{p_1} = \frac{\pi''(M_5)}{\pi''(M_4)} \cdot \frac{\pi(M_4)}{\sigma_{43}\pi(M_3)} \cdot \frac{\pi'(M_2)}{\pi'(M_1)} , \\
& \frac{p_5'}{p_1} = \frac{\pi''(M_5')}{\pi''(M_4')} \cdot \frac{\pi(M_4')}{\sigma_{4'3}\pi(M_3)} \cdot \frac{\pi'(M_2)}{\pi'(M_1)} , \\
& p_5 \frac{\pi''(M_4)}{\pi''(M_5)} \cdot \frac{y(M_4) F_A}{\sqrt{T_5^* \frac{\tau''(M_4)}{\tau''(M_5)\tau(M_4)}}} + \frac{\pi''(M_4') p_5 y(M_4') F_B}{\pi''(M_5')\sqrt{T_5^{*\prime} \frac{\tau''(M_4')}{\tau''(M_5')\tau(M_4')}}} = \\
& = y(M_3) \frac{F_c}{\sqrt{T_3^*}} p_1 \frac{\pi'(M_2)}{\pi'(M_1)} , \\
& M_3 \sqrt{\kappa R T_3^* \tau(M_3)} = M_2 a_1 \frac{\alpha'(M_2)}{\alpha'(M_1)} , \quad T_3^* = \frac{G_4 T_4^* + G_4' T_4^{*\prime}}{G_4 + G_4'} .
\end{aligned}
\right\} \qquad (19)
$$

Анализ этих систем уравнений показывает, что взаимодействие волн с разветвлением сопровождается ростом потерь (по сравнению с индивидуальными) и их дроблением. Это не позволяет получить коэффициент наполнения более высокий, чем в двигателях с индивидуальными впускными и выпускными каналами. Оптимальная схема газовоздушного тракта представлена на рис. 8.

Существование предельного коэффициента наполнения позволяет ввести для оценки степени совершенства ГВТ коэффициент совершенства газовоздушного тракта, представляющий отношение действительного коэффициента наполнения к предельному

$$
K_{ГВТ} = \frac{\eta_v}{\eta_v^0} .
$$

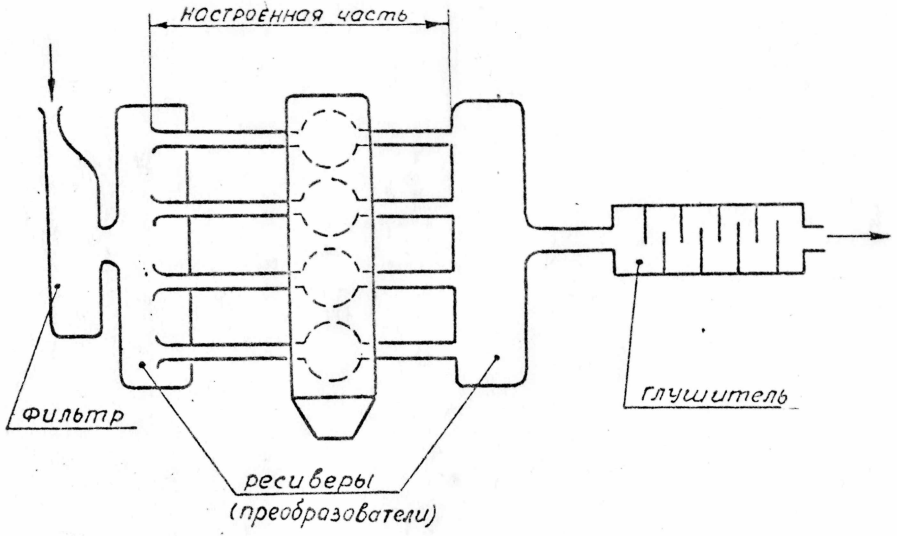


Рис. 8.

Оптимальная схема многоцилиндрового двигателя.

Анализ газовоздушных трактов отечественных транспортных ДВС показывает, что их коэффициент совершенства ГВТ находится в пределах 0,53 ÷ 0,60. Наивысший $K_{ГВТ}$ получен у гоночного двигателя фирмы *NSU* – 0,90. Разница в коэффициентах совершенства указывает на значительные резервы современных ДВС в улучшении характеристик за счет увеличения коэффициента наполнения.

Для определения оптимальных размеров газовоздушного тракта четырехтактных двигателей совместно с Березиным С.Р. установлены зависимости между обобщенными переменными, характеризующими процесс газообмена, и коэффициентом наполнения. Эти зависимости позволяют на стадии проектирования предварительно выбрать основные размеры оптимального газовоздушного тракта двигателя и затем с помощью математической модели уточнить величину коэффициента наполнения. Такая последовательность определения размеров ГВТ значительно уменьшает затраты машинного времени и сокращает сроки проектирования.

В настоящее время все более широкое применение находит газотурбинный наддув. В связи с этим актуальны вопросы рационального использования энергии выпускных газов. В работе рассмотрена возможность использования неустановившихся газодинамических процессов для получения высоких значений коэффициента совершенства ГВТ при рациональном использовании энергии выпускных газов. Показано, что выполнение газовоздушного тракта комбинированного двигателя по оптимальной схеме позволяет наиболее эффективно использовать располагаемую энергию выпускных газов, так как сочетает в себе преимущества импульсной и изобарной выпускных систем. На рис. 9 представлены расчетные кривые давления у впускных и выпускных органов и рабочей камере двигателя 4Н 15/15, выпускная система которого выполнена по оптимальной схеме. Как видно из рис. 9, эта система позволяет осуществить продувку рабочей камеры, даже если постоянное давление перед турбиной в 1,5 раза превышает давление на впуске. Причем этот эффект не зависит от уровня давления на впуске.

В шестой главе рассмотрены особенности использования неустановившихся газодинамических процессов в газовоздушных трактах двухтактных двигателей. В связи с отсутствием в двига-

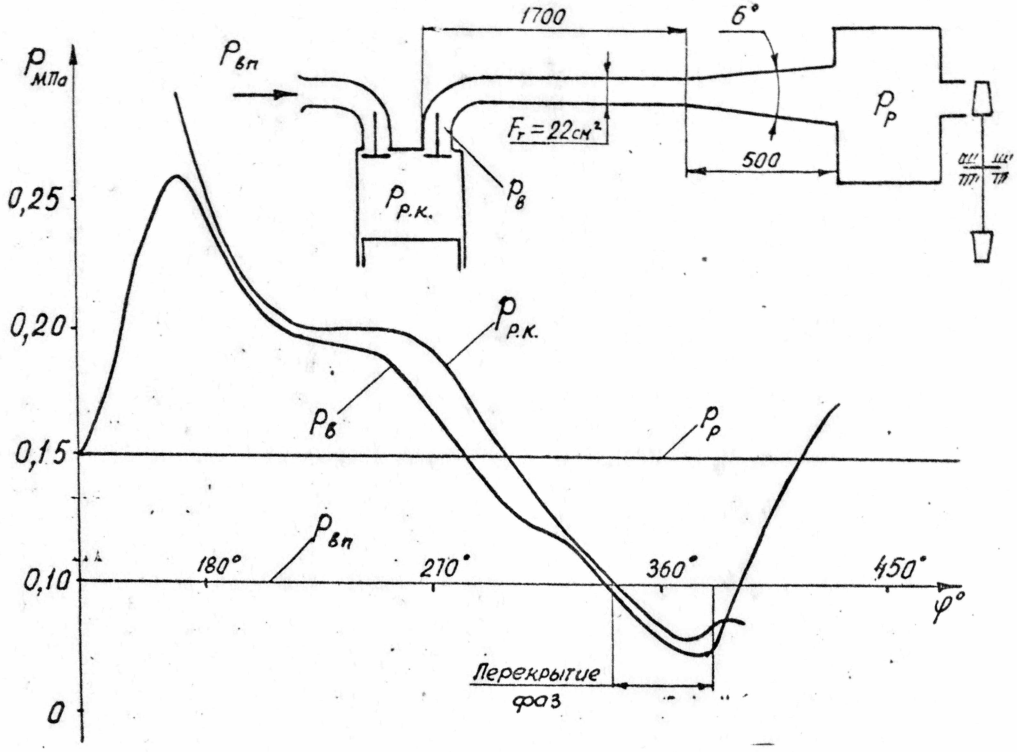

1700
6°
$P_{вп}$
$F_г = 22см^2$
$P_р$
500
$P_{р.к.}$
$P_в$
$P_{МПа}$
0,25
0,20
0,15
0,10
0
$P_{р.к.}$
$P_в$
$P_р$
$P_{вп}$
180°
270°
360°
450°
φ°
Перекрытие
фаз

Рис. 9.

телях этого типа тактов всасывания и выталкивание, продувка и заполнение рабочей камеры свежим зарядом принципиально возможны лишь путем использования неустановившихся процессов в газовоздушном тракте или за счет установки дополнительного агрегата - компрессора. Разработанная математическая модель использовалась для анализа газообмена двигателя "Буран" с кривошипно-камерной продувкой и выбора основных размеров газовоздушного тракта. На газообмен двухтактного двигателя оказывает влияние значительно большее количество факторов, чем у четырехтактного. Кроме того, в связи с тем, что смена заряда происходит в зоне наибольших объемов рабочей камеры, на коэффициент наполнения существенно влияет характер движения газа в ней. Отсутствие методов расчета трехмерного течения газа в замкнутых объемах не позволило решить задачу о предельном коэффициенте наполнения двухтактного двигателя, хотя несомненно он существует.

В седьмой главе обсуждаются методы управления расходом воздуха по внешней скоростной характеристике двигателя.

Если бы была возможность регулировать все основные размеры газовоздушного тракта двигателя, то на всех частотах вращения коэффициент наполнения был бы равен предельному (с точностью до диссипативных процессов). Эта кривая является верхней границей поля возможных значений коэффициента наполнения. В этом поле принципиально может быть получен любой закон протекания $\eta_v = f(n)$. Целесообразность его будет определяться требованиями к внешней характеристике двигателя и сложностью регулирования ГВТ.

Рассматривается три метода управления внешней границей поля возможных значений η_v: пассивный, активный и комбинированный.

Пассивный метод заключается в том, что основные параметры ГВТ в процессе эксплуатации двигателя не меняются, но выбираются такими, чтобы получить заданный закон изменения $\eta_v = f(n)$. В многокамерных двигателях возможности пассивного метода более широкие, чем у однокамерных, так как в рамках оптимальной схемы ГВТ разные рабочие камеры могут настраиваться на свой собственный закон протекания $\eta_v = f(n)$.

Активные методы управления заключаются в том, что пара-

метры ГВТ меняются или в процессе эксплуатации двигателя или непосредственно во время его работы.

В многокамерных двигателях возможны различные законы активного регулирования газовоздушных трактов отдельных рабочих камер.

При комбинированном методе регулирования часть ГВТ настраивается пассивно, например, выпускная система, а часть регулируется.

В главе приведены схемы регулируемых газовоздушных трактов, разработанные автором совместно с инженерами Куваниным В.А., Глуховым К.В., Шаланговым К.С. и Вахитовым Ю.Р. и защищенных тремя авторскими свидетельствами, в которых используется эффект отражения волны конечной амплитуды от отверстия в трубопроводе, исследованный автором совместно с инженерами Глуховым К.В., Вахитовым Ю.Р. и Шаланговым К.В.

В случае быстроходных ДВС методы управления внешней расходной характеристикой весьма перспективны, что подтверждается результатами настройки газовоздушных трактов двигателей М-412НВ, УМЗ-6, "Буран" и др.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный комплекс исследований, обобщенный в диссертации, позволяет сделать следующие выводы:

I. Газообмен двигателей внутреннего сгорания, включая и комбинированные двигатели, зависит от большого количества факторов: конструктивных и физических. Газовые потоки в газовоздушных трактах двигателей являются пространственными и неустановившимися. Теория газообмена ДВС должна давать ответ на то, как наиболее качественно организовать движение воздуха и отработавшего газа в газовоздушном тракте двигателя, чтобы обеспечить наиболее эффективное заполнение рабочей камеры свежим зарядом. Важность этой задачи обусловлена существенной зависимостью выходных показателей двигателей от величины заряда. Существующая теория газообмена двигателей внутреннего сгорания недостаточно раскрывает влияние неустановившихся процессов в газовоздушных трактах на показатели газообмена.

2. Известные методы расчета основаны на уравнениях, не учитывающих важные особенности протекания газообмена ДВС, что снижает степень достоверности полученных результатов.

3. Разработана одномерная математическая модель и программа расчета процесса газообмена, удовлетворяющая основным законам сохранения и отражающая все основные процессы, имеющие место в газовоздушном тракте. Показана высокая достоверность расчетных данных.

4. Для описания явлений в газовоздушном тракте двигателя предложена и обоснована физическая модель, согласно которой газовоздушный тракт делится на две части: основной и дополнительный. В основной включены элементы, которые есть в любом двигателе: впускные и выпускные каналы, впускные и выпускные органы, рабочая камера; в дополнительную - все остальные.

5. С помощью разработанной математической модели установлен механизм газодинамических эффектов в основном газовоздушном тракте. Показано, что при первой оптимальной длине механизм увеличения коэффициента наполнения объясняется движением уединенной волны, генерируемой в том же цикле; при последующих - остаточными волнами от предыдущего цикла (по третью оптимальную длину включительно). С четвертой оптимальной длины рост η_v объясняется приходом уединенных волн от предыдущих циклов и возможным сложением остаточных от них волн.

6. В работе на основании установленного механизма газодинамических эффектов:

6.1. Обосновано существование предельной глубины разрежения за выпускными окнами для трубопровода постоянного поперечного сечения по длине и установлена ее величина.

6.2. Установлено наличие предела повышения давления у впускных органов и установлена его величина, которая объясняет причину высокой эффективности настройки впускной системы.

6.3. Показан механизм "мегафонного эффекта", заключающийся в сложении отраженных волн от конусной части канала и от открытого конца трубопровода.

7. Путем "численных экспериментов" в работе установлен предельный коэффициент наполнения однокамерного четырехтактного двигателя внутреннего сгорания. Доказано, что этот коэффициент наполнения является предельным и для многокамер-

ных ДВС. На его основе для оценки качества газовоздушного тракта введен коэффициент совершенства газовоздушного тракта $K_{гвт}$. Проведенный анализ показал большие резервы современных транспортных двигателей по увеличению расхода воздуха через них за счет коэффициента наполнения.

8. В работе сформулирован принцип построения оптимальной (обеспечивающей наибольший коэффициент наполнения) схемы ГВТ, заключающийся в настройке основного ГВТ и отделении основного ГВТ от дополнительного путем введения между ними ресивера достаточного объема, обеспечивающего эффективное отражение уединенных волн.

9. Проведен анализ современных выпускных систем комбинированных ДВС и показано, что наибольшей эффективностью обладает выпускная система, выполненная по оптимальной схеме, позволяющая использовать преимущества импульсной и изобарной систем, что приводит к снижению уровня производства энтропии на ~20% и расширению диапазона совместной работы турбокомпрессора и двигателя. Кроме того, применение этой системы на бензиновых двигателях позволит использовать энергию выпускных газов на турбине и в то же время осуществлять продувку рабочей камеры без применения компрессора на впуске.

10. В работе показана возможность управления расходом воздуха для обеспечения заданного закона протекания внешней скоростной характеристики путем применения пассивных и активных методов управления размерами газовоздушных трактов отдельных рабочих камер. Применение регулирования и настройки ГВТ позволит более эффективно подстраивать характеристику двигателя к характеристике потребителя механической энергии, что даст возможность более эффективно использовать тепло, вводимое в двигатель.

11. На основании развитых представлений о движении уединенных волн рассмотрен газообмен двухтактных двигателей, показано, что схема выпускных каналов, дающая наилучшие результаты в двухтактных ДВС, совпадает с оптимальной схемой, предсказываемой теорией.

12. Широкое использование предложенных методов, рекомендаций имеет большое народнохозяйственное значение, поскольку обусловливает улучшение экономичности двигателей на 10%...20%, увеличение литровой мощности на 50%...60% или соответствующее

снижение удельного веса двигателя; возможность более широкой унификации двигателей за счет изменения (или замены) ГВТ; уменьшение объема экспериментально-доводочных работ и сроков создания новых образцов двигателей.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

I. Рудой Б.П. Расчет параметров газа в выхлопной системе двигателя внутреннего сгорания. – Науч.тр./Уфимск.авиац.ин-т, 1967, с.52-58.

2. Рудой Б.П. Об интенсивности волн сжатия в выхлопной трубе двигателя внутреннего сгорания. – Науч.тр./Уфимск.авиац. ин-т, 1967, вып.9, с.47-52.

3. Рудой Б.П. К расчету параметров выпускного импульса. – – Науч.тр./Уфимск.авиац.ин-т, 1968, вып. 10, с.29-35.

4. Рудой Б.П. Влияние времени окна на интенсивность волны сжатия.–Науч.тр./Уфимск.авиац.ин-т, 1968,вып.10,с.56-62.

5. Рудой Б.П. Течение газов во впускной и выпускной системах ДВС.– ИВУЗ. Машиностроение, 1968, № 12, с.93-98.

6. Рудой Б.П., Гришин Ю.А. Газодинамические функции для одномерных изоэнтропических нестационарных течений газа. – – Науч.тр./Уфимск.авиац. ин-т, 1969, вып.11, с.46-51.

7. Рудой Б.П. Влияние некоторых конструктивных параметров выпускной системы на глубину разрежения в цилиндре.–Науч. тр./Уфимск.авиац.ин-т, 1969, вып. 11, с. 26-31.

8. Рудой Б.П. О механизме динамических явлений во впускной и выпускной системах ДВС.– В кн.: Пути повышения мощности, надежности и долговечности двигателей внутреннего сгорания./ Тез.докл. и сообщ. Всесоюзн. научно-техн.конф. М., 1973, с. 65-66.

9. Рудой Б.П., Гришин Ю.А. О взаимодействии простых волн с контактной поверхностью. – Науч.тр./Уфимск. авиац. ин-т, 1975, вып. 96, с. 62-68.

10. Рудой Б.П. Влияние длины трубопровода на время опорожнения сосуда. – Науч.тр./Уфимск.авиац. ин-т, 1975, 1975, вып.96, с. 73-80.

11. Рудой Б.П., Виноградов В.В., Гончаренко В.А. Влияние площади выпускного трубопровода на время опорожнения сосуда. – – Изв. АН СССР. Прикладная механика, Киев, 1975, № 4, с. 104-106.

I2. Рудой Б.П. О законах сохранения при расчете процессов наполнения и опорожнения рабочих объемов двигателей со сгоранием по $V-const$. Науч.тр./Уфимск. авиац. ин-т, I974, вып. 82, с. 3-II.
I3. Рудой Б.П. К расчету процессов наполнения и опорожнения рабочих объемов двигателей внутреннего сгорания. - Науч.тр./ Уфимск. авиац. ин-т, I974, вып. 82, с. II-I7.
I4. Рудой Б.П., Виноградов В.В., Гришин Ю.А. Отражение волн конечной амплитуды от открытого конца трубопровода. - - Науч.тр./ Уфимск. авиац. ин-т, I974, вып. 82, с. 35-42.
I5. Рудой Б.П., Виноградов В.В. Влияние близости стенки на отражение волны конечной амплитуды от открытого конца трубопровода. - Науч.тр./ Уфимск. авиац.ин-т, I974, вып. 82, с. 59-64.
I6. Рудой Б.П. К вопросу о коэффициенте расхода в нестационарном потоке газа. - Науч.тр./Уфимск. авиац. ин-т, I974, вып. 82, с. 64-68.
I7. Рудой Б.П. О механизме динамических явлений во впускной и выпускной системах ДВС. - Межвуз. научн. сб. Элементы теории рабочих процессов ДВС. Уфа, I976, № I, с. 3-I0.
I8. Рудой Б.П. О выборе схемы впускной и выпускной систем ДВС.- - Межвуз. научн. сб. Элементы теории рабочих процессов ДВС. Уфа, I976, № I, с.40-45.
I9. Рудой Б.П., Глухов К.В., Вахитов Ю.Р., Шалангов К.С. Экспериментальное исследование отражения волн конечной амплитуды от отверстия в трубопроводе. - Межвуз.научн.сб. Элементы теории рабочих процессов ДВС. Уфа, I976, № I, с. 26-3I.
20. Рудой Б.П., Березин С.Р., Гришин Ю.А. О подогреве газа при адиабатическом наполнении сосуда. - Межвуз.научн.сб. Элементы теории рабочих процессов ДВС. Уфа,-I976, № I, с.40-45.
2I. Рудой Б.П., Гришин Ю.А. Установка для генерирования уединенных волн конечной амплитуды. - Межвуз. научн. сб. Элементы теории рабочих процессов ДВС. Уфа, I976, № I, с.53-56.
22. Рудой Б.П., Виноградов В.В. К вопросу о величине минимального давления за выпускным клапаном ДВС. - ИВУЗ. Машиностроение, I976, № 8, с. 93-97.
23. Рудой Б.П. Оптимальная схема газовоздушного тракта четырехтактного двигателя внутреннего сгорания. - ИВУЗ, Машиностроение, I976, № 9, с. II4-II8.

24. Рудой Б.П., Гришин Ю.А., Круглов М.Г. Газодинамические функции для расчета нестационарных течений газа. – ИВУЗ. Машиностроение, 1977, № 3, с. 52–56.
25. Рудой Б.П., Березин С.Р. О взаимосвязи впускной и выпускной систем ДВС. – Межвуз.научн.сб. Вопросы теории и расчета тепловых двигателей. Уфа, 1977, № 1, с. 13–17.
26. Гришин Ю.А., Круглов М.Г., Рудой Б.П. Нестационарное течение газа в системе выпускной трубопровод комбинированного ДВС – осевая турбина. – Труды МВТУ № 257. Комбинированные двигатели, М., 1977, вып. 1, с.85–103.
27. Рудой Б.П. Основы теории газообмена ДВС. Учебное пособие.– Уфа, 1977.
28. Рудой Б.П. Теория газообмена ДВС. Учебное пособие. – Уфа, 1978.
29. Рудой Б.П., Березин С.Р. Численное исследование процесса газообмена двухтактного двигателя с кривошипно-камерной продувкой. Межвуз. научн. сб. Вопросы теории и расчета рабочих процессов тепловых двигателей. Уфа, 1978, вып.2, с. 7 – 15.
30. Рудой Б.П., Березин С.Р. О направлении движения газа при нестационарном наполнении и опорожнении сосуда. – Межвуз. научн.сб. Вопросы теории и расчета рабочих процессов тепловых двигателей. Уфа, 1978, вып. 2, с. 7–15.
31. Рудой Б.П., Березин С.Р. Влияние конструктивных и термодинамических параметров выпускной системы на эффективность волновой очистки четырехтактного ДВС. – Межвуз. научн. сб. Вопросы теории и расчета рабочих процессов тепловых двигателей. Уфа, 1979, вып. 3, с.
32. Рудой Б.П. Использование волновых процессов в газовоздушных трактах комбинированных ДВС для повышения их эффективности.– – В кн.: Проблемы создания и использования двигателей с высоким наддувом./Тез. докл. Всесоюзн. научно-техн. конф. Харьков, 1979, с. 213–216.
33. Рудой Б.П. О рациональном использовании энергии выпускных газов в КДВС. – В кн.: Перспективы развития комбинированных двигателей внутреннего сгорания и двигателей новых схем и топлив./Тез.докл.Всесоюзн.научно-техн.конф. М., 1980,с.35–36.
34. Рудой Б.П., Галиуллин Ф.Ф. Метод глушения шума выпуска ДВС.– В кн.: Перспективы развития комбинированных двигателей

внутреннего сгорания и двигателей новых схем и топлив./ Тез. докл. Всесоюзн. научно-техн. конф. М., 1980, с.77.
35. Рудой Б.П., Хамидуллин А.К. Влияние ресиверов в газовоздушном тракте ДВС на отражение волн конечной амплитуды. - - В кн.: Перспективы развития комбинированных двигателей внутреннего сгорания и двигателей новых схем и топлив./ Тез. докл. Всесоюзн. научно-техн. конф. М., 1980, с. 36.
36. Рудой Б.П., Березин С.Р. Расчет на ЭВМ показателей качества газообмена ДВС. Учебное пособие. - Уфа, 1977.
37. А.с. 584086 (СССР). Устройство газообмена для двигателя внутреннего сгорания./ Б.П.Рудой, К.В.Глухов, Ю.Р.Вахитов, К.С.Шалангов. - Опубл. в Б.И., 1977, № 46.
38. А.с. 863864 (СССР). Устройство газообмена для двигателя внутреннего сгорания./ Б.П.Рудой, К.В.Глухов, Ю.Р.Вахитов, К.С.Шалангов. - Опубл. в Б.И., 1979, № 19.
39. А.с. 544759 (СССР). Система газораспределения для двигателя внутреннего сгорания./ Б.П.Рудой, В.К.Куванин.- Опубл. в Б.И., 1977, № 4.

Подп. в печать 5. II. 1981 г. Л85748. Формат 60x90 1|16.
Тираж 100 Заказ № 239.

Ротапринт филиала УГТ-2 при УАИ Госкомиздата Башкирской АССР.
Уфа, К. Маркса, 12