

условия позволяют исследовать данный процесс с более высокой степени достоверности. Именно такая попытка и была предпринята в данной работе.

2. Разработана математическая модель двигателя, позволяющая в трехмерной постановке исследовать неравномерность газодинамического процесса во внутренних полостях двигателя. Отличительной особенностью модели от известных является то, что в ней учитывается движение трех компонентов: чистого воздуха, паров бензина и продуктов сгорания. Разработана компьютерная программа.

3. В данный момент математическая модель двигателя и разработанная на ее основе программа находятся в стадии отладки и тестирования. Следующим этапом развития программы будет применение более совершенной модели горения смеси, позволяющей учитывать неоднородность состава смеси в камере сгорания.

Литература:

1. Entwicklung von emissionsreduzierten Zweitaktmotoren fuer handgefuerte Arbeitsgeraete/ W. Zahn, W. Vonderau, H. Roskamp, K. Geyer und and. // MTZ. – 2002. – №2. – S.106–113.

2. The Potential of Small Loop-Scavenged Spark-Ignition Single-cylinder Two-Stroke Engines/ By Franz J. Laimboeck. – Warrendale, Pa., 1991. – 73 p.

3. Двухтактные карбюраторные двигатели внутреннего сгорания / В.М. Кондрашов, Ю.С. Григорьев, В.В. Тупов и др. – М.: Машиностроение, 1990. – 271 с.

4. Blair G.P. Design and Simulation of Two-Stroke Engines. – Commonwealth Drive Warrendale: SAE, 1996. – 591 p.

5. Стечкин Б. С. Индикаторная диаграмма, динамика тепловыделения и рабочий цикл быстроходного поршневого двигателя. «Академия наук СССР», М., 1960.

6. Тупарев Ж.Н. Влияние неравномерности рабочего процесса на эффективные показатели дизеля// Сб. научных трудов ППИ. – Пермь, 1974. – С. 61–65.

7. Лобов Н. В., Кус Н. Н., Исследование межцикловой неустойчивости у бензиновых двухтактных двигателей Труды междунар. науч. техн. конф.: "Актуальные проблемы теории и практики современного двигателестроения", Южно-Урал. гос. ун-т, Челябинск, 2006.

8. Лобов Н.В. Моделирование рабочего процесса в двухтактном одноцилиндровом двигателе внутреннего сгорания. – Пермь: Изд-во ПермГТУ, 2003. – 81 с.

9. Двухтактные карбюраторные двигатели внутреннего сгорания / В.М. Кондрашов, Ю.С. Григорьев, В.В. Тупов и др. – М.: машиностроение, 1990. – 272 с.: ил.

РАСЧЕТНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ РАЗМЕРОВ ВЫПУСКНОГО ТРАКТА ПУВРД

Черноусов А.А. (Уфимский государственный авиационный технический университет)

Полезная работа пульсирующего воздушно-реактивного двигателя (ПуВРД) определяется произведением скорости полета на силу тяги P , в образовании которой большую роль играет нестационарное истечение продуктов сгорания (ПС), при исходно более высокой их температуре, чем в ВРД.

Для увеличения тяги ПуВРД используют эффект присоединенной массы в эжекторном усилителе тяги (ЭУТ), работающем в нестационарном режиме и превращающим выпускной тракт ПуВРД в эффективное расширительное устройство, в котором располагаемая работа ПС преобразуется в работу силы тяги. Предварительное сжатие свежего заряда (СЗ) способно повысить не только массовое напол-

нение рабочей камеры (РК), но и удельную тягу P/G_T – в том случае, когда выигрыш от увеличения работоспособности ПС в РК превысит затраты эксергии на осуществление наддува. Массовое наполнение РК, плотность, давление и температуру можно дополнительно увеличить, осуществив волновой наддув при соответствующей «настройке» впускного (из нагнетательного ресивера в РК) канала и согласовав фазы газообмена с волновыми процессами во всем газоздушном тракте (ГВТ). Указанные мероприятия приближают характеристики действительного цикла ПуВРД к теоретическому циклу двигателя с подводом теплоты при $V=const$ и продолженным расширением. Грамотная их реализация позволит сохранить высокие массогабаритные показатели ПуВРД и, возможно, превзойти воздушно-реактивные двигатели (со сгоранием при $p=const$) по экономическим показателям.

Цель работы состояла в теоретической оценке предельной величины тяги, создаваемой выпускной системой ПуВРД, при оптимальной волновой настройке всех каналов, начиная с впускного. Моделирование отбора энергии на привод компрессора составляет серьезную самостоятельную задачу и не является целью настоящего исследования. Поэтому найденное расчетом предельное значение удельной тяги оптимально настроенного ГВТ ПуВРД следует рассматривать недостижимое на практике.

Проанализируем влияние режимных и конструктивных факторов на модуль тяги P , создаваемой лишь выпускной системой неподвижного ПуВРД: размерность ПуВРД, задаваемая объемом РК V_{PK} или характерным размером $l_{PK} = V_{PK}^{1/3}$, частота циклов f , параметры воздуха во впускном ресивере p_k и T_k , атмосферное давление p_0 и большой ряд конструктивных параметров ГВТ, определяющих картину течения в нем при прочих равных условиях.

Искомymi показателями ПуВРД, помимо P , может быть поданная в РК в расчете на один цикл масса СЗ (воздуха) m'_u и цикловая масса в РК $m_u < m'_u$, а также удельный расход топлива $g_T = G_T/P$. В обобщенные функциональные связи указанные величины входят в обезразмеренном виде: отвлеченная тяга $\bar{P} = P/(p_k l_{PK}^2)$, коэффициент заполнения РК $\eta'_V = m_u/(\rho_k V_{PK})$ и коэффициент использования продувочного воздуха $\varphi_u = m_u/m'_u$. При фиксированных значениях интегральных характеристик рабочего процесса (H_u , α , l_0 , полнота сгорания x_z) и системы наддува ($\pi_k = p_k/p_0$, η_{ks}) тяга P для класса ПуВРД с геометрически подобными ГВТ описывается функциональной связью

$$P = P(l_{PK}, f, p_k, T_k, T_W, c_p, c_V, \mu, \lambda, D), \quad (1)$$

где c_p и c_V – удельные теплоемкости, μ , λ и D – коэффициенты молекулярного переноса для СЗ (воздуха), а T_W – температура стенки ГВТ в характерной точке (при подобии распределения температуры ГВТ). «Обезразмеривание» зависимости (1) дает следующее выражение:

$$\bar{P} = \frac{P}{p_k l_{PK}^2} = \frac{P}{p_k l_{PK}^2} \left(\frac{f l_{PK}}{\sqrt{c_p T_k}}, \frac{p_k f l_{PK}^2}{c_p T_k \mu}, \frac{T_W}{T_0}, \frac{c_p}{c_V}, \frac{\mu c_p}{\lambda}, \frac{\mu c_p T_k}{p_k D} \right), \quad (2)$$

где $k = c_p/c_V$ – отношение теплоемкостей, $Pr = \mu c_p/\lambda$ – число Прандтля и $\mu c_p T_k/(p_k D)$ – аналог числа Шмидта – параметры физических свойств СЗ, $T_W/T_0 = \theta$ – температурный фактор, обобщенно учитывающий влияние температуры стенок на теплоотдачу. Зафиксировав в качестве СЗ воздух ($k = idem$, $R = c_p - c_V = idem$

и т. д.), можно заменить в (2) $\sqrt{c_p T_K}$ на $c_K = \sqrt{kRT_K}$, а $c_p T_K$ – на c_K^2 , а также вывести три последних параметра (2) из числа определяющих переменных и записать

$$\bar{P} = \bar{P}(M', Re', \theta),$$

где $M' = fl_{PK} / c_K$ и $Re' = p_K fl_{PK}^2 / (\mu c_K^2)$ – аналоги чисел Маха и Ренольдса. Предполагая приближенно далее течение в ГВТ *автомодельным* как по Re' , так и по θ , можно привести критериальное уравнение к виду

$$\bar{P} = \bar{P}(M'), \quad (3)$$

упрощение которого далее уже невозможно, т.к. это противоречит физической картине волнового течения в «настроенном» ГВТ, для подобия которой в первую очередь важно соотношение частоты циклов и характерной собственной частоты колебаний газовой смеси в каналах ГВТ.



Рис.1. Параметризованная схема ГВТ ПуВРД с ЭУТ

Задача отыскания оптимального сочетания конструктивных размеров элементов ГВТ при сделанных допущениях сводится к поиску экстремума зависимости (3), в которую добавлены параметры размеров ГВТ принятой схемы. Так, имея в виду ГВТ, показанный на рис. 1, кроме уже учитываемых в (3) параметров f , l_{PK} , p_K и T_K , следует добавить в данное критериальное уравнение нижеследующие безразмерные переменные (симплексы и угловые величины).

Относительной длиной $\bar{L}_{en} = L_{en} / l_{PK}$ и диаметром $\bar{d}_{en} = d_{en} / l_{PK}$ задаются размеры впускного канала, размеры выпускного канала (до ЭУТ) – относительными длинами канала $\bar{L}_{вып} = L_{вып} / l_{PK}$, его цилиндрического участка $\bar{L}'_{вып} = L'_{вып} / l_{PK}$ и его диаметром $\bar{d}_{вып} = d_{вып} / l_{PK}$ на этом участке, а также углом раствора конуса $\alpha_{вып}$. Подобные же параметры нужны для задания геометрии ЭУТ – $\bar{L}_{эж}$, $\bar{L}'_{эж}$, $\bar{d}_{эж}$, $\alpha_{эж}$, $\bar{L}_{ex}$, $\bar{L}'_{ex}$ и α_{ex} , см. рис. 1. Законы открытия газораспределительных органов (принятые здесь трапециевидными, с уклонами шириной в 20° поворота условного кривошипа) характеризуются лишь угловой продолжительностью их открытия $\Delta\varphi_{en}$ и $\Delta\varphi_{вып}$.

С учетом сказанного функциональная связь, в рамках приближенного подобия задающая зависимость тяги $\bar{P}$ от набора определяющих параметров – режимного (приведенной частоты циклов $M' = fl_{PK} / c_K$) и пятнадцати конструктивных, принимает вид

$$\bar{P} = \bar{P}(M', \bar{L}_{en}, \bar{d}_{en}, \bar{L}_{вып}, \bar{L}'_{вып}, \bar{d}_{вып}, \alpha_{вып}, \bar{L}_{эж}, \bar{L}'_{эж}, \bar{d}_{эж}, \alpha_{эж}, \bar{L}_{ex}, \bar{L}'_{ex}, \alpha_{ex}, \Delta\varphi_{en}, \Delta\varphi_{вып}) \quad (4)$$

Задача поиска экстремума зависимости (4) решалась при конкретных значениях некоторых базовых параметров ГВТ. Так, параметры во впускном ресивере бы-

ли равны $p_K = 320$ кПа и $T_K = 440,8$ К, что соответствует сжатию в компрессоре с $\pi_K = 3,2$ и $\eta_{Ks} = 0,84$ от атмосферных параметров $p_0 = 100$ кПа и $T_0 = 300$ К, а объем рабочей камеры для определенности принимался в расчетах равным $V_{PK} = 0,001$ м³, так что ее характерный размер составил $l_{PK} = 0,1$ м. Были заданы элементарный состав и свойства топлива – приняты для бензина среднего состава с $C = 0,855$, $H = 0,145$ – стехиометрическое соотношение $l_0 = 14,78$, низшая теплотворная способность $H_u = 43,9$ МДж/кг, применена модель внутреннего смесеобразования при коэффициенте избытка воздуха в камере $\alpha = 1,2$ и полноте сгорания $x_z = 0,98$.

Задача оптимизации ГВТ решалась как задача с ограничениями, в основном конструктивного характера. Так, накладывалось ограничение сверху на диаметры вып. и вп. каналов (и соответствующие им наибольшие номинальные сечения) газообменных органов: $\bar{d}_{\text{вын max}} = \bar{d}_{\text{вп max}} = 0,9$. Трапецевидные законы открытия органов газообмена «вписывались» в период газообмена именно так, как изображено на рис. 1. Присутствие обобщенной частоты циклов $M' = f l_{PK} / c_K$ в списке оптимизируемых параметров обеспечило, с одной стороны, дополнительную степень свободы, с другой – потребовало связать длительность периода газообмена $(360^\circ - \Delta\varphi_{yz})$ с частотой циклов f для учета изменения угловой продолжительности сгорания $\Delta\varphi_{yz}$:

$$f = \frac{u_{T0} \Delta\varphi_{yz}}{360 l'_{PK}},$$

где принято: $u_{T0} = 30$ м/с – условная скорость фронта турбулентного пламени и $l'_{PK} = 0,108$ м (как для цилиндра с высотой, равной диаметру).

Углы раствора двух конусов, играющих в основном роль диффузоров, также были ограничены: $\alpha_{\text{вын max}} = \alpha_{\text{вп max}} = 16^\circ$.

Процессы в ГВТ ПуВРД численно моделировались расчетной программой («солвером») системы имитационного моделирования (СИМ) «Альбея» [1], находящимся в стадии интенсивной разработки. Для численного расчета ГВТ представляется набором типовых элементов, таких как гладкие участки каналов и емкости, а также связи между ними, трактуемые как местные сопротивления (МС).

Модели, заложенные в расчетные модули, в основном основываются на подходах, описанных в [2]; решаемые модулями СИМ уравнения базируются на законах сохранения (ЗС) одномерной нестационарной динамики газовой смеси в трубопроводе (участки каналов) и на ЗС, описывающих термодинамические явления в емкостях. Кроме ЗС и их следствий, в модели входят зависимости эмпирического вида, служащие для учета действительных характеристик элементов ГВТ, таких, как зависимости для потерь полного давления на МС и характеристика продувки РК. Зависимости для потерь на МС, использованные для решения данной задачи, получены расчетами по методике [3] для условной упрощенной геометрии этих органов. Для моделирования потерь СЗ при продувке РК применялась двухзонная модель, замкнутая продувочной характеристикой, рассчитанная по методике [4]. Она соответствует картине течения, близкой к послойному вытеснению.

Многопараметрическая оптимизация ГВТ по критерию $\bar{P}$ проводилась с помощью генетического алгоритма поиска экстремума целевой функции (ЦФ). Генетические алгоритмы (ГА) обеспечивают ускоренный перебор точек пространства параметров ЦФ при постепенном тяготении к областям локальных, а затем и глобального минимума ЦФ, при дискретном (но сколь угодно подробном) пред-

ставлении уровней варьирования параметров. Поиск основан на улучшении «популяции» – набора реализаций оптимизируемого объекта. Свойства каждой реализации кодируются линейной структурой (в принципе, представленной нулями и единицами), образующей его «генотип» и используются при расчетной оценке «качества» экземпляра по величине ЦФ. Над структурой генотипа выполняются операции, имитирующие эволюцию (точнее, искусственно ускоряемую селекцию) – отбор и выбраковка, скрещивание (простое или родственное), мутации и др., что дает повышение «качества» экземпляров в поколениях. ГА удобны для нахождения оптимального сочетания параметров ГВТ. Для этого в программу встраивается пользовательская процедура оценки величины ЦФ, для расчета процессов в ГВТ вызывающая солвер СИМ. В данной работе была использована программа **genesis** [5], реализующая ГА.

Каждый из 16 определяющих параметров (4) варьировался на 16 уровнях; этого достаточно, чтобы примерно определить положение точки экстремума в условиях принятых диапазонов. Смоделирована эволюция «популяции» из 25 экземпляров в течение 400 поколений, т. е. сделано 10000 оценок целевой функции. Расчеты вариантов ГВТ проводились с шагом в 1° ПКВ до 80-го цикла, что заняло 18 часов времени ЦПУ AMD Sempron 3200+ с тактовой частотой 1,94 ГГц; при полном переборе потребовалось бы выполнить 16^{16} или около $1,84 \cdot 10^{19}$ расчетов.

В результате автоматического подбора параметров найдена точка, в которой на безразмерной частоте циклов $M' = 0,0229$ расчетная безразмерная тяга, создаваемая выпускной системой, достигла максимума $\bar{P} = 0,318$, удельный расход топлива составил $g_T = G_T / P = 0,086$ кг/(Н·ч), а интегральные параметры газообмена – $\eta'_V = 1,78$ (!) и $\varphi_u = 0,732$.

Оценена тяга входного устройства (ВУ компрессора): при числе Маха в ВУ $M_n = 0,7$ она составляет 73% тяги выпускной системы, и с учетом этого полученная расчетом *предельная тяга* класса ПуВРД рассмотренной схемы (при принятых ограничениях) выражается величиной $\bar{P} = 0,550$, а предельный удельный расход топлива – $g_T = G_T / P = 0,050$ кг/(Н·ч).

Конструктивные параметры ГВТ в оптимальной по $\bar{P}$ точке оказались следующими:

$$\bar{L}_{en} = 4,44; \quad \bar{d}_{en} = 0,88; \quad \bar{L}_{вып} = 10,6; \quad \bar{L}'_{вып} = 2,12; \quad \bar{d}_{вып} = 0,78; \quad \alpha_{вып} = 8,3^\circ; \quad \bar{L}_{эж} = 9,53; \\ \bar{L}'_{эж} = 2,95; \quad \bar{d}_{эж} = 3,62; \quad \alpha_{эж} = 16^\circ; \quad \bar{L}_{ex} = 3,90; \quad \bar{L}'_{ex} = 2,53; \quad \alpha_{ex} = 34^\circ; \quad \Delta\varphi_{en} = 156^\circ; \quad \Delta\varphi_{вып} = 135^\circ.$$

Данным значениям примерно соответствуют пропорции схемы ГВТ на рис. 1.

Недостатком проведенного расчетного исследования является неучет отбора располагаемой работы на привод компрессора, который приведет на практике лишь к уменьшению как расхода воздуха через двигатель, так и тяги. Можно лишь предполагать, что наддув возможно организовать без снижения на много десятков процентов от уровня полученных *предельных* показателей ПуВРД.

Обработка результатов в обобщенных переменных позволяет применить полученные данные для ГВТ ПуВРД различной размерности. Все же опыт и здравый смысл подсказывают, что получаемые таким образом рекомендации могут использоваться лишь в качестве отправных точек при проведении проектировочных и доводочных работ.

Литература:

1. Горбачев В.Г., Загайко С.А., Рудая Н.В. и др. Система имитационного моделирования «Альбея» (ядро). Руководство пользователя. Руководство программиста. // Учебное пособие. – Уфа: УГАТУ, 1995. – 112 с.

2. Рудой Б.П. Прикладная нестационарная гидрогазодинамика. // Учебное пособие. – Уфа: УАИ, 1988. – 184 с.
3. Черноусов А.А. Определение гидравлических характеристик местных сопротивлений в газоздушных трактах ДВС вычислительным экспериментом. // Дисс. ... канд. техн. наук. Уфа: УГАТУ, 1998. – 164 с.
4. Рудой Б.П., Черноусов А.А. Определение продувочных характеристик рабочих камер двигателей внутреннего сгорания вычислительным экспериментом. // Тр. Межд. н.-техн. конф., 23-25 апреля 2003 г., Челябинск: Изд.-во ЮУрГУ, 2003. – с. 133-140.
5. <ftp://ftp.aic.nrl.navy.mil/pub/galist/src/genesis.tar.Z>.

РАСЧЕТ РАЗВЕТВЛЕНИЯ ТРУБОПРОВОДОВ

Гришин Ю.А. (МГТУ им.Н.Э. Баумана)

При моделировании газообмена многоцилиндровых двигателей с разветвляющимися впускными и выпускными трубопроводами (коллекторами) необходимо применять те или иные методики расчета взаимодействия нестационарного потока с разветвлениями. Созданием таких методик занимались многие отечественные [1-5] и зарубежные исследователи [6,7]. Для расчетов предлагалось использовать допущение о равенстве статических давлений в ответвлениях после взаимодействия, квазистационарные зависимости, и, наконец, наиболее точный подход на базе распада произвольного разрыва (РПР) с образованием ударных фронтов, сложным анализом получающихся волновых конфигураций и с учетом различного состава взаимодействующих газов. К сожалению, все методики являются исключительно громоздкими, например, для тройников необходимо с помощью итераций решать систему 6 сложных уравнений с 6 неизвестными и логическим анализом. Фактически это исключает возможность маршевого многовариантного расчета нестационарного газообмена ДВС с целью оптимизации его параметров.

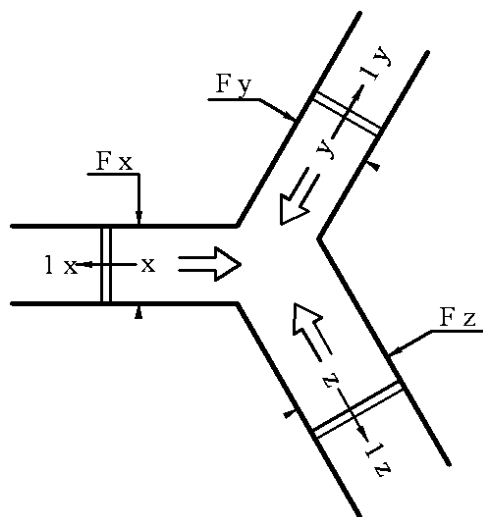


Рис.1. К расчету тройникового узла

направление течений. Пусть положительным будет направление к центру тройника. Тогда известные значения M , очевидно, задаются с соответствующими знаками.

При реальных для коллекторов ДВС градиентах температур числа M на контактных поверхностях после РПР различаются весьма незначительно, поэтому при

Применение нестационарных газодинамических функций (НГДФ) и определенные рациональные допущения позволяют резко упростить данную задачу. Пусть имеется тройник с известными проходными сечениями сходящихся ветвей F_x , F_y , F_z (рис.1). По результатам расчета на предыдущем шаге, например, методом распада разрыва (схема Годунова С.К.), известны газодинамические параметры, в частности, давления p_{lx} , p_{ly} , p_{lz} и числа Маха M_{lx} , M_{ly} , M_{lz} ($M = \sqrt{kRT}$) в зонах до прохода элементарных волн. Волны на рис.1 обозначены двойными линиями. Для расчета необходимо выбрать условно-положительное