

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.

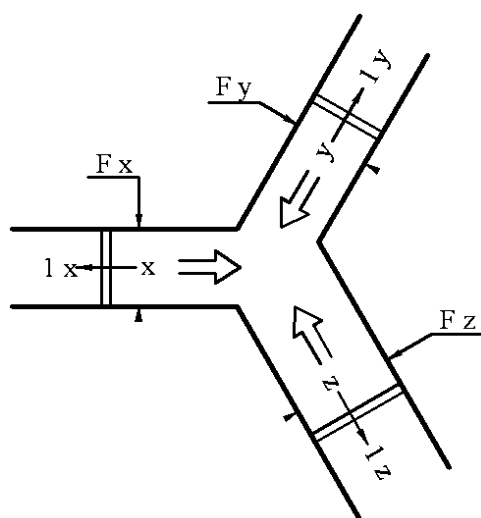


Рис.1. К расчету тройникового узла

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_{1x}, p_{1y}, p_{1z} и числа Маха M_{1x}, M_{1y}, M_{1z} ($M = \sqrt{kRT}$) в зонах до прохода элементарных волн. Волны на рис.1 обозначены двойными линиями. Для расчета необходимо выбрать условно-положительное

рассмотрении волновых конфигураций эти поверхности можно не учитывать. Соответствующие соотношения для перепадов давления через газодинамические функции в самом общем виде могут быть записаны следующим образом:

$$\frac{p_{1x}}{p_{1y}} = \frac{p_x}{p_y} \frac{p_x}{p_{1y}} = \frac{\pi''(M_{1x})}{\pi''(M_x)} \frac{\sigma_x \pi(M_x)}{\sigma_y \pi(M_y)} \frac{\pi''(M_y)}{\pi''(M_{1y})}; \quad (1)$$

$$\frac{p_{1y}}{p_{1z}} = \frac{p_y}{p_z} \frac{p_y}{p_{1z}} = \frac{\pi''(M_{1y})}{\pi''(M_y)} \frac{\sigma_y \pi(M_y)}{\sigma_z \pi(M_z)} \frac{\pi''(M_z)}{\pi''(M_{1z})}; \quad (2)$$

$$\frac{p_{1z}}{p_{1x}} = \frac{p_z}{p_x} \frac{p_z}{p_{1x}} = \frac{\pi''(M_{1z})}{\pi''(M_z)} \frac{\sigma_z \pi(M_z)}{\sigma_x \pi(M_x)} \frac{\pi''(M_x)}{\pi''(M_{1x})}. \quad (3)$$

Здесь $\pi''(M) = 1/[1+(k-1)M/2]^{2k/(k-1)}$ - НГДФ [9] для перепада давлений на фронтах элементарных волн после РПР, $\pi(M) = 1/[1+(k-1)M^2/2]^{k/(k-1)}$ - «стационарная» ГДФ [10] для перепада давлений в зоне квазистационарного течения между волнами, σ - коэффициенты потерь полного давления при входе в соответствующие ветви тройника. Очевидно, что одно из этих соотношений может считаться лишним, т.к. получается из двух других.

С помощью ГДФ $q(M)$ можно в общем виде записать уравнение сохранения расходов по ветвям:

$$F_x \sigma_x q(M_x) + F_y \sigma_y q(M_y) + F_z \sigma_z q(M_z) = 0. \quad (4)$$

Обозначив $f_y = F_y/F_x$, $f_z = F_z/F_x$, для реальных в коллекторах ДВС значений чисел $M < 0,4$ вместо этого уравнения можно использовать

$$M_x = -M_y f_y \sigma_y / \sigma_x - M_z f_z \sigma_z / \sigma_x. \quad (5)$$

Раскрывая запись функций $\pi''(M)$ и $\pi(M)$ и, используя обозначения

$$Y = \left(\frac{p_{1y} \sigma_z}{p_{1z} \sigma_y} \right)^{2k} \frac{1+(k-1)M_{1y}/2}{1+(k-1)M_{1z}/2} \sqrt{\frac{1+(k-1)M_y^2/2}{1+(k-1)M_z^2/2}}; \quad (6)$$

$$Z = \left(\frac{p_{1x} \sigma_z}{p_{1z} \sigma_x} \right)^{2k} \frac{1+(k-1)M_{1x}/2}{1+(k-1)M_{1z}/2} \sqrt{\frac{1+(k-1)M_x^2/2}{1+(k-1)M_z^2/2}}, \quad (7)$$

из первых трех уравнений получим:

$$Y = \frac{1+(k-1)M_y/2}{1+(k-1)M_z/2}; \quad (8)$$

$$Z = \frac{1+(k-1)M_x/2}{1+(k-1)M_z/2}. \quad (9)$$

Используя (5), с помощью уравнений (8) и (9) легко получить общий вид формул РПР для определения двух других чисел M :

$$M_y = \frac{2}{k-1} (Y-1) + Y M_z; \quad (10)$$

$$M_z = \frac{2}{k-1} \frac{1-Z-(Y-1)f_y \sigma_y / \sigma_x}{Z + f_z \sigma_z / \sigma_x + Y f_y \sigma_y / \sigma_x}. \quad (11)$$

При расчете в первую очередь необходимо определить направления перетоков по ветвям после РПР, т.е. в зонах x , y и z . До определения этих направлений невозможно задать и потери, которыми будут сопровождаться перетоки. Анализ показал, что для определения направлений на первом этапе потери можно не учитывать, т.е. все $\sigma = 1$. Кроме того, значения радикалов в (6) и (7), мало отличающиеся от 1, при анализе направлений можно принять равными единице.

С учетом указанных допущений формулы (6), (7), далее, (11), (10) и (15) позволяют легко вычислять искомые неизвестные числа M со своими знаками, определяющими направления течений в ветвях за фронтами волн. Например, если получилось $M_x > 0$, $M_y > 0$ и $M_z < 0$, значит из ветвей x и y на расчетном шаге численного расчета Δt будет происходить втекание в z .

Теперь следует выполнить второй этап расчета. Потери полного давления σ задаются формулой $\sigma = 1 - k\zeta\lambda^2 / (k + 1)$ из [9], где λ – приведенная скорость, ζ – коэффициент гидравлических потерь, зависящий от углов пристыковки ветвей и соотношения расходов между ветвями. Его значения задаются либо с помощью предварительных экспериментальных продувок, либо по известным из литературы зависимостям, например из справочника [10]. Используя связь между M и λ [9], например, при определении потерь полного давления в зоне z в результате втекания туда потоков из x и y , запишем $\sigma_z = 1 - k\zeta_z M_z^2 \tau(M_z) / 2$ или

$$\sigma_z \approx 1 - k\zeta_z M_z^2 / 2. \quad (12)$$

Так как потоки из ветвей x и y вытекают, и отрывных зон там нет, в формулах (5), (6), (7) и (11) задаем $\sigma_x = \sigma_y = 1$. Кроме того, для уточнения расчета в (6) и (7) можно учесть несколько отличающиеся от единицы значения радикалов, используя для их определения соответствующие числа M , полученные на этапе определения направлений потоков.

Если первый этап расчета РПП показал, что потоки направляются из одной ветви в две другие, на втором этапе необходимо определять два значения σ для каждой из «принимающих» ветвей. Затем они подставляются в (5), (6), (7) и (11).

В качестве рекомендации для маршевого расчета отметим следующее. Если число M_x , M_y или M_z по результатам первого этапа по модулю оказалось меньше некоторого малого наперед заданного ε , его следует принять равным 0, чтобы на втором этапе не получить изменение направления соответствующего потока.

Отметим также, что полученные на первом этапе M_x , M_y и M_z можно считать окончательными, если места стыка ветвей внутри выполнены скругленными, и потеря при перетоках не будет. Такие коллектора, например, имеют место в тракторных дизелях Д-37Е, Д-144.

Можно отметить рекомендацию для ускорения расчетов, которая заключается в том, что вычислений с потерями вполне можно использовать значения σ предыдущего расчетного шага, принимая «старые» направления перетоков. Тогда расчет РПП можно делать в один этап.

После определения M_x , M_y и M_z по схеме С.К.Годунова с помощью НГДФ определяются параметры перетоков:

$$\begin{aligned} v_x &= M_x a_{1x} \alpha''(M_x) / \alpha''(M_{1x}); & v_y &= M_y a_{1y} \alpha''(M_y) / \alpha''(M_{1y}); \\ p_x &= p_{1x} \pi''(M_x) / \pi''(M_{1x}); & p_y &= p_{1y} \pi''(M_y) / \pi''(M_{1y}); \\ \rho_x &= p_{1x} \varepsilon''(M_x) / RT_{1x} \varepsilon''(M_{1x}); & \rho_y &= p_{1y} \varepsilon''(M_y) / RT_{1y} \varepsilon''(M_{1y}), \end{aligned}$$

а также значения массы, импульса и энергии

$$\begin{aligned} m_x &= F_x v_x \rho_x \Delta t; & m_y &= F_y v_y \rho_y \Delta t; \\ I_x &= (F_x p_x + m_x v_x) \Delta t; & I_y &= (F_y p_y + m_y v_y) \Delta t; \\ E_x &= m_x \left[\frac{p_x}{(k-1)\rho_x} + \frac{v_x^2}{2} \right] \Delta t; & E_y &= m_y \left[\frac{p_y}{(k-1)\rho_y} + \frac{v_y^2}{2} \right] \Delta t, \end{aligned}$$

Для выполнения балансового этапа расчетной схемы Годунова массы, импульсы и энергии в последних ячейках ветвей x и y при $M_x > 0$, $M_y > 0$ и $M_z < 0$,

необходимо уменьшить на соответствующие значения, а в последней ячейке ветви z , куда втекают потоки, увеличить на сумму этих величин.

Анализ результатов показал, что данная методика позволяет определять параметры РПР в тройниках с приемлемой ошибкой – менее 3%. Для расчета газообмена и оптимизации рабочего процесса ДВС это вполне достаточно.

Литература:

1. Красовский О.Г. Численное решение уравнений нестационарного течения для выпускных систем двигателей. – Тр. ЦНИДИ, 1968.- Вып. 57.- С.3-20.
2. Ивин В.И., Рындин В.В. Нестационарный поток в разветвлениях выпускных трубопроводов ДВС // Изв. вузов. Машиностроение, 1976.- N 9.- С.100-105.
3. Камкин С.В., Матвеев С.К., Кочерыженков Г.В. Численное моделирование течений в разветвленных выпускных системах судовых дизелей // Двигателестроение. - 1979.-N 6.- С.3-5.
4. Гришин Ю.А., Гусев А.В., Круглов М.Г. Методы расчета разветвленных систем газообмена ДВС // Двигателестроение. - 1981.-N 1.- С.10-12.
5. Рудой Б.П. Прикладная нестационарная газовая динамика.- Уфа: Изд-во УАИ, 1988.-184 с.
6. Benson R., Woollatt D., Woods W.A. Unsteady flow in simple branched systems //Proc. Inst. Mech. Eng.- 1963 1964.- V.178.- P. 104 - 112.
7. Seifert H. Die Berechnung instationarer Stromungs Vorgange in den Rohrleitungs-Systemen von Mehrzylindermotoren //MTZ. - 1972.- Bd.33, № 11.-S.421 - 428.
8. Гришин Ю.А., Круглов М.Г., Рудой Б.П. Газодинамические функции для расчета нестационарных течений газа // Изв. вузов. Машиностроение, 1977.- N 3.- С. 52-58.
9. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика, В 2 ч. Ч. 1.- М.: Наука, 1991.- 600 с.
10. Кутателадзе С.С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление.- М.: Энергоатомиздат, 1990.-367 с.

ПРИМЕНЕНИЕ К-ε МОДЕЛИ ТУРБУЛЕНТНОСТИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ГОРЕНИЯ В ДВС

Тишин С.А., Потапов С.А. (Тульский государственный университет)

При моделировании турбулентного горения в ДВС возникает необходимость в расчете полей коэффициентов турбулентного переноса. Широко используемой моделью турбулентности является k - ε модель, имеющая только две эмпирически определяемые константы [1]. Модель позволяет определить значения коэффициента турбулентного обмена ν_T с помощью двух транспортных уравнений - для кинетической энергии турбулентности k и скорости диссипации этой энергии ε :

$$\frac{\partial(\bar{\rho} \tilde{k})}{\partial \tau} + \text{div}(\bar{\rho} \tilde{u} \tilde{k}) - \text{div}(\bar{\rho} \nu_T \text{grad} \tilde{k}) = G_k - \bar{\rho} \tilde{\varepsilon}; \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\bar{\rho} \tilde{\varepsilon})}{\partial \tau} + \text{div}(\bar{\rho} \tilde{u} \tilde{\varepsilon}) - \text{div}(\bar{\rho} \nu_T \text{grad} \tilde{\varepsilon}) = (C_1 G_k - C_2 \bar{\rho} \tilde{\varepsilon}) \frac{\tilde{\varepsilon}}{\tilde{k}}; \quad (2)$$

$$\nu_T = C_v \frac{\tilde{k}^2}{\tilde{\varepsilon}}, \quad (3)$$

где: u – скорость; ρ - плотность; τ - время; G_k – источник турбулентности – сложная функция тензора напряжений; знак сверху "-" означает осреднение; знак