

1) разработанная методика проектирования проточной части компрессора турбонаддува транспортного дизеля включает комплекс авторских методик расчета эффективности элементов проточной части, известных адаптированных методик расчета течений, авторский атлас экспериментальных характеристик модельных ступеней для чисел Маха $M_U = 0,8 \dots 0,9$ и реально используется для проектирования промышленных образцов до значений $M_U = 1,2 \dots 1,3$.

2) структура методики позволяет осуществлять ее постоянное совершенствование и расширение диапазона использования с учетом новых данных по физике движения воздушного потока и влияния критериев подобия (M, Re).

Литература:

1. Бондарь В.Н., Малоземов А.А. Технический уровень, состояние производства и перспективы развития дизельных двигателей для промышленных тракторов в Российской Федерации // Труды МНТК «Актуальные проблемы теории и практики современного двигателестроения» – Челябинск: ЮурГУ, 2003, С. 20-22.

2. Боровиков А.В., Симонов А.М., Гнездилов С.М. Влияние гидравлических потерь в компрессоре турбонаддува на характеристики транспортного дизеля // Двигателестроение, 2006. – № 3. – С.16–19.

РАСЧЁТ РАЦИОНАЛЬНЫХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ВПУСКНЫХ И ВЫПУСКНЫХ КАНАЛОВ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Адамия Р.Ш., Манджавидзе А.А., Натриашвили Т.М.
(Институт механики машин АН Грузии)

Одним из перспективных направлений улучшения технико-экономических и экологических показателей двигателей внутреннего сгорания (ДВС) является совершенствование газоздушного тракта (ГВТ). Определяющими в формировании аэродинамических характеристик всего ГВТ являются впускные и выпускные каналы ДВС, так как именно на этих участках, сосредоточены основные газодинамические потери. Кроме того от структуры течения воздуха во впускном канале в большой мере зависит процесс смесеобразования в дизельных двигателях [1].

Создание адекватной математической модели, описывающей трёхмерное нестационарное движение газа, пригодной для численной оптимизации профилей впускных и выпускных каналов ДВС, является весьма сложной задачей.

Несмотря на возрастающие возможности вычислительной техники, проведение оптимизации путём непосредственного решения дифференциальных уравнений описывающих нестационарное трёхмерное течение, является проблематичным. В связи с этим в настоящей работе разработана эквивалентная одномерная математическая модель, которая учитывает основные особенности трёхмерного течения.

Система дифференциальных уравнений описывающих трёхмерное нестационарное течение трёхмерного газа имеет вид:

$$\begin{aligned}
 \text{Уравнение непрерывности} & \quad \frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \operatorname{div}(\rho \cdot \vec{v}) = 0 \\
 \text{Уравнение Эйлера} & \quad \rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial \tau} = \operatorname{grad} P \\
 \text{Уравнение энергии} & \quad \rho \frac{de^*}{dt} = \operatorname{div}(\vec{p} \cdot \vec{v}) + \operatorname{div}(\vec{k} \cdot \operatorname{grad} T)
 \end{aligned} \tag{1}$$

где: \vec{v} - вектор скорости; P-давление; T-температура; ρ -плотность; k- показатель адиабаты ; $e^* = \frac{v \cdot v}{2} + e$ - полная энергия единицы массы газа.

Учитывая небольшую протяжённость впускных и выпускных клапанов пренебрежение трением и теплообменом в трёхмерных уравнениях можно считать приемлемой, тем более, что эти параметры нами учитываются в эквивалентной однородной модели. Из за существенной кривизны стенок каналов, целесообразно преобразовать условия задачи в такую криволинейную систему координат в которой граничные поверхности описывались бы достаточно простыми соотношениями. Приведём полную систему уравнений к дивергентному виду [1]. После несложных преобразований систему уравнений (1), можно записать в криволинейных координатах в векторном виде:

$$\frac{\partial \bar{Q}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{E}}{\partial \xi} + \frac{\partial \bar{F}}{\partial \eta} + \frac{\partial \bar{G}}{\partial \zeta} = 0 \quad (2)$$

где:

$$\bar{Q} = \begin{pmatrix} \rho \\ \rho \cdot u \\ \rho \cdot v \\ \rho \cdot w \\ \rho \cdot e^* \end{pmatrix}, \quad \bar{E} = \begin{pmatrix} \rho \cdot U \\ \rho \cdot u \cdot U + p \xi x \\ \rho \cdot u \cdot U + p \xi y \\ \rho \cdot v \cdot U + p \xi z \\ (\rho \cdot e^* + p) \cdot U + \text{grad}T \cdot \text{grad}\xi \end{pmatrix}, \quad (3)$$

$$\bar{F} = \begin{pmatrix} \rho \cdot V \\ \rho \cdot u \cdot V + p \xi x \\ \rho \cdot u \cdot V + p \xi y \\ \rho \cdot v \cdot V + p \xi z \\ (\rho \cdot e^* + p) \cdot V + \text{grad}T \cdot \text{grad}\eta \end{pmatrix}, \quad \bar{G} = \begin{pmatrix} \rho \cdot W \\ \rho \cdot u \cdot W + p \xi x \\ \rho \cdot u \cdot W + p \xi y \\ \rho \cdot v \cdot W + p \xi z \\ (\rho \cdot e^* + p) \cdot W + \text{grad}T \cdot \text{grad}\zeta \end{pmatrix}, \quad (4)$$

Для конечно-разностной аппроксимации векторного уравнения (2) на интервале (τ_0, τ_N) вводим равномерную сетку по τ с шагом h_τ . Так как в задаче принимается $\tau = 0$, то для любого $n \tau_n = n h_\tau$. Для векторов в уравнении (3) вводится обозначение вида:

$$Q(P, \tau_n) = Q^n \quad (5)$$

С целью аппроксимации производных по τ на трёхточечном по τ шаблоне по методу Бица и Уорминга [2], вводя двухпараметрическое семейство по τ и опустив слагаемые второго порядка, для второго уравнения (2) получим конечно-разомкнутый аналог.

$$\begin{aligned} \Delta Q^n + \frac{\Theta \cdot h_\tau}{1 + \alpha} \left(\frac{\partial(\Delta \bar{E}^n)}{\partial \xi} + \frac{\partial(\Delta \bar{F}^n)}{\partial \eta} + \frac{\partial(\Delta \bar{G}^n)}{\partial \zeta} \right) = \\ = - \frac{h_\tau}{1 + \alpha} \left(\frac{\partial(\Delta \bar{E}^n)}{\partial \xi} + \frac{\partial(\Delta \bar{F}^n)}{\partial \eta} + \frac{\partial(\Delta \bar{G}^n)}{\partial \zeta} \right) + \Delta Q^{n-1} \end{aligned} \quad (6)$$

После линеаризации относительно вектора \bar{Q}_n , пренебрегая членами второго порядка, получим:

$$\Delta \bar{Q}^n + \frac{\Theta \cdot h_\tau}{1 + \alpha} \left\{ \frac{\partial}{\partial \xi} \left[\frac{\partial \bar{E}^n}{\partial \bar{Q}} \cdot \Delta \bar{Q}^n \right] + \frac{\partial}{\partial \eta} \left[\frac{\partial \bar{F}^n}{\partial \bar{Q}} \cdot \Delta \bar{Q}^n \right] + \frac{\partial}{\partial \zeta} \left[\frac{\partial \bar{G}^n}{\partial \bar{Q}} \cdot \Delta \bar{Q}^n \right] \right\} = \bar{\Phi}^n, \quad (7)$$

где:

$$\bar{\Phi}^n = -\frac{h_\tau}{1+\alpha} \left(\frac{\partial \bar{E}^n}{\partial \xi} + \frac{\partial \bar{F}^n}{\partial \eta} + \frac{\partial \bar{G}^n}{\partial \zeta} \right) + \frac{\alpha}{1-\alpha} \Delta \bar{Q}^{n-1}, \quad (8)$$

Для решения системы уравнений (7) применяется приближённая факторизация системы по методу Н.Н. Яненко [3]. Отбросив слагаемые $o(h^2 \tau / h^2)$ и $o(h^3 \tau / h^3)$, что вполне обосновано при выборе достаточно мелкого шага по τ по сравнению с h , из системы (7) получим три расчленённые системы:

$$\Delta \tilde{\bar{Q}}^n + \frac{\Theta \cdot h_\tau}{1+\alpha} \cdot \frac{\partial}{\partial \xi} \left[\frac{\partial \bar{E}^n}{\partial \bar{Q}} \cdot \Delta \tilde{\bar{Q}}^n \right] = \bar{\Phi}^n, \quad (9)$$

$$\Delta \tilde{\bar{Q}}^n + \frac{\Theta \cdot h_\tau}{1+\alpha} \cdot \frac{\partial}{\partial \eta} \left[\frac{\partial \bar{F}^n}{\partial \bar{Q}} \cdot \Delta \tilde{\bar{Q}}^n \right] = \Delta \tilde{\bar{Q}}^n, \quad (10)$$

$$\Delta \bar{Q}^n + \frac{\Theta \cdot h_\tau}{1+\alpha} \cdot \frac{\partial}{\partial \zeta} \left[\frac{\partial \bar{G}^n}{\partial \bar{Q}} \cdot \Delta \bar{Q}^n \right] = \Delta \tilde{\bar{Q}}^n, \quad (11)$$

где:

$$\left\{ E + \frac{\Theta \cdot h_\tau}{1+\alpha} \cdot \frac{\partial}{\partial \eta} \left[\frac{\partial \bar{F}^n}{\partial \bar{Q}} \right] \right\} \cdot \left\{ E + \frac{\Theta \cdot h_\tau}{1+\alpha} \cdot \frac{\partial}{\partial \zeta} \left[\frac{\partial \bar{G}^n}{\partial \bar{Q}} \right] \right\} = \Delta \tilde{\bar{Q}}^n \quad (12)$$

В начале решается система (9) и определяется вектор $\Delta \bar{Q}^n$. Затем решается система (10) и определяется вектор $\Delta \tilde{\bar{Q}}^n$. И наконец из решения системы (11) определяется вектор $\Delta \bar{Q}^n$. Каждая из систем (9),(10),(11) содержит производные (причём первые) только по одной независимой переменной ξ, μ, ζ .

Недостающее в этих уравнениях получаем из граничных условий. Для математического описания расчётной области занимаемой каналом, задаваемого с помощью одного параметра u , (принимающего в области канала значение от 0 до 1), в каждой точке осевой линии канала, проводится плоскость, ортогональная осевой линии и положение точки в каждой плоскости определяется двумя параметрами λ и v (Рис.1).

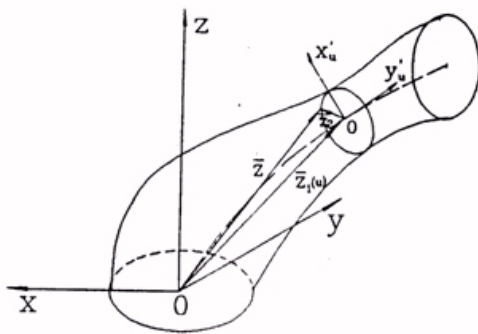


Рис.1. Схема для математического описания формы канала

Таким образом, радиус-вектор произвольной точки канала относительно неподвижной системы координат вычисляется в виде $z(u, v, \lambda) = z_1(u) + z_2(v(u), \lambda(u))$. Координаты x_u и y_u любой точки плоскости ортогональной осевой линии, задаются выражением

$$x_u = a(u) \lambda^{1/2p} |\cos 2\pi v|^{1/p} \text{sign}(\cos 2\pi v), \quad (13)$$

$$y_u = a(u) \lambda^{1/2p} |\cos 2\pi v|^{1/q} \text{sign}(\cos 2\pi v)$$

При описанном выборе параметров в криволинейной системе координат, область интегрирования уравнений газодинамики представляет прямоугольный параллелепипед. Осевая линия определяется уравнениями в виде полинома третьей степени:

$$\bar{r} = \bar{r}(u) = \bar{a}_0 + \bar{a}_1 u + \bar{a}_2 u^2 + \bar{a}_3 u^3 \quad (14)$$

Где $U_v[0.1]$ безразмерный параметр, задающий положение осевой линии канала; a_i ; ($i=0\div 3$)-векторные коэффициенты. Для приведения математической модели к эквивалентному одномерному аналогу, вычисляются усредненные во времени компоненты вектора скорости в каждой точке пространственной модели. Далее вычисляются длины каждой точки по формуле

$$l(X_2^0; X_3^0) = \frac{\sqrt{v_1^2 + v_2^2 + v_3^2}}{v_1} \Delta X = \frac{|V|}{v_1} \Delta X_1 \quad (15)$$

В каждой точке определяется направление скорости вдоль координаты η

$$W = \eta_x u + \eta_y v + \eta_x w \quad (16)$$

Площадь поперечного сечения потока, определяется как площадь части кольца со средним радиусом- $\rho_{cp} = a(u) \cdot f$ и толщиной $\delta = \frac{a(u)}{n}$ (где n количество участков разбиения от центра канала до границы) по формуле

$$S = \frac{2\pi}{n^2} a^2(u) \lambda \quad (17)$$

Суммарная длина линии тока принимается равной $l = l_{впер} + l_{наз}$ где $l_{впер} = \frac{\sum l_K}{NW}$; $l_{наз} = \frac{\sum l'_K}{NN}$ где NW и NN количества линий тока для течения вперед и назад.

Для суммарной линии тока площадь поперечного сечения и периметр определяется как усредненные величины при движении вперед и назад по формулам

$$S = \frac{S_f \cdot NW + S_b \cdot NN}{NW + NN}; \quad \Pi = \frac{\Pi_f \cdot NW + \Pi_b \cdot NN}{NW + NN} \quad (18)$$

Тогда система дифференциальных уравнений, описывающая эквивалентное одномерное нестационарное течение с учетом трения и теплообмена будет иметь следующий вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial T}{\partial \tau} + W \cdot \frac{\partial T}{\partial X} + \frac{R \cdot T}{\mu \cdot F \cdot C_v} \left(F \frac{\partial W}{\partial X} + W \frac{\partial F}{\partial X} \right) = - \frac{\alpha \cdot \Pi \cdot R \cdot T}{\rho \cdot F \cdot C_v \cdot \mu} (T - T_{CT}) \\ \frac{\partial W}{\partial \tau} + W \frac{\partial W}{\partial X} + \frac{R \cdot T}{\mu \cdot \rho} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial X} + \lambda_T \frac{W^2 \cdot \Pi}{2 \cdot F} = 0 \\ \frac{\partial \rho}{\partial \tau} + W \cdot \frac{\partial \rho}{\partial X} + \frac{\rho}{F} \left(\frac{\partial F}{\partial \tau} + W \cdot \frac{\partial F}{\partial X} \right) + \rho \cdot \frac{\partial W}{\partial X} + \frac{P \cdot R}{C_v \cdot F_\mu} \cdot W \cdot \frac{\partial F}{\partial X} = - \frac{R \cdot \Pi \cdot \alpha}{\mu \cdot F \cdot C_v} (T - T_W) \end{cases} \quad (19)$$

где R, μ, C_v соответственно газовая постоянная, молекулярная масса и теплоёмкость газа, λ_T ; j коэффициенты трения и теплопередачи между газом и каналом.

Система уравнений (19) решается методом конечных разностей (МКР), при этом учитываются основные характеристики многомерного течения, что позволяет провести численные эксперименты с целью оптимизации основных элементов ГВТ.

Используя описанную методику был оптимизирован впускной канал дизелей КамАЗ-740 и КАЗ-642. Из рис.2 видно, что по параметру u имеется весьма узкая область, где энергетические потери минимальны.

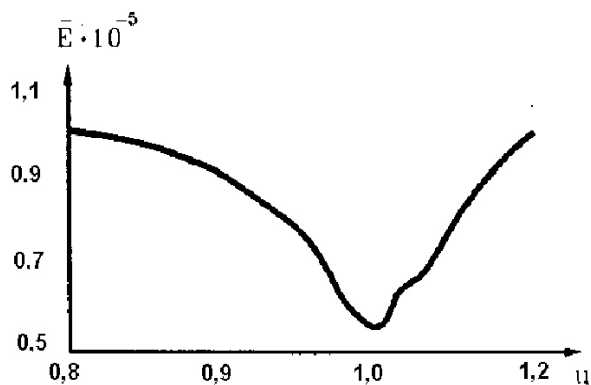


Рис.2. Зависимость энергетического критерия от геометрических параметров канала (u).

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

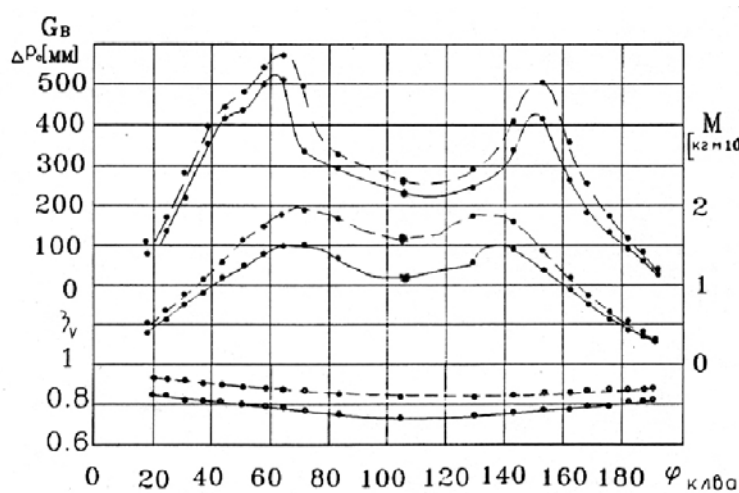


Рис. 3. Газодинамические характеристики базового (-----) и нового (—) впускного канала 8ч 12/12 и 8ч 12/12

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

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

Литература

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

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

Киселёв Б.А. (ГНЦ РФ – ФГУП «НАМИ»)

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