

Брютов А.А.

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова
Научный руководитель – П.К. Сеначин, д.т.н., профессор

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ГАЗОВОГО ДВИГАТЕЛЯ

Актуальность для города Барнаула состоит в следующем. ОАО «Барнаултрансмаш» выполняет конвертацию дизельных двигателей на газовое топливо. Рабочий процесс таких двигателей существенно отличается от дизельного двигателя. Поэтому разработка математических моделей, описывающих процесс сгорания и тепловыделения в конвертированном на газ двигателе, позволит быстрее достичь требуемых результатов, сократить дорогостоящие экспериментальные исследования, что является актуальным как для ОАО «Барнаултрансмаш», так и для отрасли двигателестроения в целом.

Целью данной работы является разработка многозонной (с числом зон не менее двух) математической модели сгорания топлива в двигателях внутреннего сгорания (ДВС) с искровым зажиганием [1]. В качестве независимой переменной, аналогичной времени t , примем угол поворота коленчатого вала $\varphi = 2\pi nt$ (угол ПКВ). Введем индексы $a, 1, u, b$, относящиеся к моментам закрытия впускного клапана и зажигания смеси, к свежей смеси и продуктам горения соответственно. Параметры смеси в моменты закрытия впускного клапана и зажигания, соответствующие углам ПКВ φ_a и φ_1 , вычисляются по известным формулам и уравнениям.

Общие уравнения математических моделей:

➤ уравнение общего объёма системы (для конструкции ДВС с аксиальным механизмом)

$$\dot{V} = V_c \frac{\varepsilon - 1}{2} \sin \varphi \left(1 + \frac{\cos \varphi}{\sqrt{1/\lambda^2 - \sin^2 \varphi}} \right), \quad (1)$$

где $\dot{V} = dV/d\varphi$ – производная от объема по углу ПКВ; $V_c = 2r(\pi D^2/4)/(\varepsilon - 1)$ – объем камеры сгорания; ε – геометрическая степень сжатия; $\lambda = r/l$ – отношение радиуса кривошипа к длине шатуна;

➤ уравнение текущего объема системы

$$V = V_u + V_b, \quad (2)$$

где V_u – объем свежей (не сгоревшей) смеси; V_b – объем продуктов сгорания;

➤ уравнение состояния свежей смеси и продуктов сгорания

$$pV_u = \frac{m_a}{M_u}(1-x)RT_u = \nu_a(1-x)RT_u; \quad (3)$$

$$pV_b = \frac{m_a}{M_b}xRT_b = \mu\nu_axRT_b, \quad (4)$$

где x – массовая доля продуктов сгорания; $\mu = M_u/M_b$ – отношение молекулярных масс свежей смеси и продуктов сгорания;

➤ уравнение энергии (температуры) свежей смеси

$$\frac{\dot{T}_u}{T_u} = \frac{R}{C_{pu}} \left(\frac{\dot{p}}{p} - \frac{\dot{Q}_u}{pV_u} \right), \quad (5)$$

где C_{Vu}, C_{pu} – молярные теплоемкости свежего газа при постоянном объеме и давлении; $\dot{Q}_u = \sum_j \dot{Q}_{uj}$ – скорость (по углу ПКВ) конвективного теплообмена свежего газа со стенками.

➤ уравнение динамики давления (энергии рабочего тела)

$$p \left(V - V_u \frac{R}{C_{pu}} - V_b \frac{R}{C_{pb}} \right) = -p \dot{V} - p x \left(\frac{V_u}{1-x} - \frac{V_b}{x} \right) + x \frac{R}{C_{pb}} m_z \dot{Q}_H - \dot{Q}_u \frac{R}{C_{pu}} - \dot{Q}_b \frac{R}{C_{pb}}, \quad (6)$$

где m_z, \dot{Q}_H – цикловая подача топлива (на один цилиндр) и низшая теплота сгорания единицы массы топлива.

Математическая модель с эмпирическим законом сгорания И.И. Вибе [2]

$$x = 1 - \exp \left[\ln(1-x^*) \left(\frac{\varphi - \varphi_1}{\varphi_z} \right)^{m+1} \right]; \quad \dot{x} = \frac{dx}{d\varphi} = -\ln(1-x^*) \frac{m+1}{\varphi_z} \left(\frac{\varphi - \varphi_1}{\varphi_z} \right)^m (1-x), \quad (7)$$

где $\varphi_z = \varphi^* - \varphi_1$ – продолжительность процесса горения практически до полного выгорания заряда $x^* = 0,999$; $m = \text{const}$ – эмпирическая величина.

Математическая модель с фронтальным горением смеси [3]

➤ Уравнение массовой скорости фронтального горения

$$\dot{x} = \frac{\langle F_t S_u \rangle}{2\pi n} \cdot \frac{1-x}{V_u} = \frac{\langle F_f S_t \rangle}{2\pi n} \cdot \frac{1-x}{V_u}. \quad (8)$$

При этом турбулентная s_t и нормальная s_u скорости связаны соотношением

$$s_t \cong \sqrt{s_u^2 + u_t^2} = \sqrt{s_u^2 + (ku_p)^2} \cong \sqrt{s_u^2 + (4,2rn)^2}, \quad (9)$$

где u_t – скорость турбулентного переноса (очагов пламени), определяемая через среднюю скорость поршня $\bar{u}_p = 4rn$.

Зависимость нормальной скорости от давления и температуры имеет вид

$$s_u = S_{u0} (p/p_0)^{s/2-1} (T/T_0)^\delta, \quad (10)$$

где p_0, T_0 – значения давления и температуры, для которых нормальная скорость пламени S_{u0} ; s – эффективный порядок суммарной химической реакции во фронте пламени.

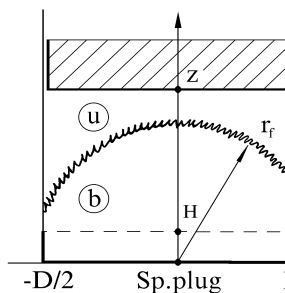


Рисунок 1 – Модель-С (камеры сгорания). Распространение фронта пламени в камере сгорания двигателя с искровым зажиганием:

r_f – радиус сферического фронта пламени;

D – диаметр поршня;

$H = 2r/(\varepsilon - 1)$ – высота камеры сгорания;

$z = HV/V_c$ – координата поршня;

Sp.plug – точка, в которой происходит зажигание.

Для Модели-С (Рисунок 1) с симметричной камерой сгорания цилиндрической формы с точкой зажигания на оси площадь поверхности пламени F_f в зависимости от текущих значений координаты поршня z и объема продуктов горения V_b находится из уравнений:

$$F_f = 2\pi r_f^2, \quad r_f = (3V_b/2\pi)^{1/3}, \quad \text{при } r_f \leq D/2, \quad r_f \leq z \quad (11)$$

$$F_f = 2\pi z r_f, \quad r_f = (V_b/\pi z + z^2/3)^{1/2}, \quad \text{при } r_f \leq D/2, \quad r_f > z \quad (12)$$

$$F_f = 2\pi r_f^2 \left[1 - \sqrt{1 - D^2/4r_f^2} \right], \quad \text{при } r_f > D/2, \quad r_f \leq z \quad (13)$$

$$r_f \left[1 - \left(1 - D^2/4r_f^2 \right)^{3/2} \right]^{1/3} = (3V_b/2\pi)^{1/3};$$

$$F_f = 2\pi r_f^2 \left[z/r_f - \sqrt{1 - D^2/4r_f^2} \right], \quad \text{при } r_f > D/2, \quad r_f > z \quad (14)$$

$$r_f \left[3z/2r_f - (z/r_f)^3/2 - \left(1 - D^2/4r_f^2 \right)^{3/2} \right]^{1/3} = (3V_b/2\pi)^{1/3}.$$

Для решения дифференциальных уравнений (1), (5)-(8) используется метод Рунге-Кутты 4-го порядка, а для решения трансцендентных уравнений (14)-(15) метод дихотомии.

Основные результаты: по данному алгоритму для расчёта процесса горения топливно-воздушной смеси в двигателях с искровым зажиганием нами разработана компьютерная программа [4].

Библиографический список

1. Кавтарадзе, Р.З. Теория поршневых двигателей. Специальные главы [Текст]: Учебник для вузов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 720 с.
2. Вибе, И.И. Теория двигателей внутреннего сгорания [Текст]: Конспект лекций. – Челябинск: Изд-во Челябин. политех. ин-та, 1974. – 252 с.
3. Льюис, Б. Горение, пламя и взрывы в газах [Текст] / Б. Льюис, Г. Эльбе: перевод с англ. – М.: Мир, 1968. – 2-е изд. – 592 с.
4. Брютов, А.А. Моделирование индикаторной диаграммы поршневого двигателя (ENGINE-INDICATION) / А.А. Брютов, П.К. Сеначин // Свид-во о ГР программы для ЭВМ № 2011617189 / ГОУ ВПО «Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова» (АлтГТУ) (RU). Заявка № 2011615726 от 29.07.2011. – Зарегистрировано в Реестре 15.09.2011.