

МОДЕЛИРОВАНИЕ СОСТАВА ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ ПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ В УСЛОВИЯХ ОБКАТКИ И РЕГУЛИРОВКИ

Ладоша Е.Н., Цымбалов Д.С., Яценко О.В.

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону

MODELING OF THE PISTON ENGINE EXHAUST IN AJUSTEMENT AND PREWORK- ING CONDITIONS

Ladosha E. N., Tsymbalov D.S., Yatcenko O.V. A detailed information model to describe the internal combustion engine operation is developed. Physical and chemical resolution of the model enables to reproduce such features as energetics, dynamics as well as exhaust toxicity. Further development of the model is purposed to integrate it into engine diagnostics equipment or techniques.

Поршневые двигатели внутреннего сгорания (ДВС) служат основной энергетической установкой автомобилей и тракторов, поэтому снижение токсичности отработавших газов актуально, особенно, в условиях наладочно-обкаточных участков предприятий, где рассеивание затруднено. Поскольку особо токсичные компоненты выхлопа вследствие малых концентраций практически не обнаружимы современными системами экспресс-анализа, перспективным представляется интеграция детальных информационных моделей внутрицилиндровой кинетики в состав газоанализаторов для регулирования ДВС.

Авторами предлагается описывать внутрицилиндровый химизм, его связь с динамикой и теплообменом следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\frac{dn_i}{dt} = f^*_i(\mathbf{n}, \rho, T) + F_i(t), \quad (1)$$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\sum f^*_i(\mathbf{n}, \rho, T) \{H_i / C_V - T\}}{\sum n_i} + q(t), \quad (2)$$

$$\frac{dQ}{dt} \equiv q(t) = -\frac{dA}{dt} - \frac{dQ_w}{dt} - \frac{dQ_{ph}}{dt}, \quad (3)$$

$$\frac{dA}{dt} = \frac{(\sin \Omega t + \gamma / 2 \sin 2\Omega t) \cdot \Omega n RT}{\frac{2}{\varepsilon - 1} + 1 - \cos \Omega t + \gamma / 2 \sin^2 \Omega t}, \quad (4)$$

$$\frac{dQ_w}{dt} = \alpha S_w (T - T_w), \quad (5)$$

$$\frac{dQ_{ph}}{dt} = L_f F_f(t), \quad (6)$$

$$\frac{dn}{dt} = \sum \frac{dn_i}{dt}, \quad (7)$$

$$\frac{dm_f}{dt} = G(t) - \frac{3D_f}{\Lambda^2} m_f, \quad (8)$$

$$F_i(t) = \delta_{i,f} \frac{3D_f m_f}{\Lambda^2 \mu_f}, \quad (9)$$

$$I d^2 \varphi / dt^2 + (k_1 + k_2 |d\varphi / dt|) d\varphi / dt + P(\varphi) S_p r(\varphi) = 0, \quad (10)$$

$$P(\varphi) = k_B RT(\varphi) / V(\varphi), \quad (11)$$

где

$$[f^*_i(\mathbf{n}, \rho, T)]^{-1} = [f^{\text{chem}}_i(\mathbf{n}, \rho, T)]^{-1} + [f^{\text{diff}}_i(\mathbf{n}, \rho, T)]^{-1},$$

$$f^{\text{diff}}_i(\mathbf{n}, \rho, T) = \frac{2 \text{sign} \{f_i(\mathbf{n}, \rho, T + \frac{T_{ad}}{2})\} - 1}{l} \times \sqrt{D \text{Re}^{1.5} n_i |f_i(\mathbf{n}, \rho, T + \frac{T_{ad}}{2})|};$$

$n = \{n_i\}$, $n_i = c_i / \rho$ – концентрации компонентов; ρ – плотность; Re – число Рейнольдса; F_i – внешние источники газообразного вещества (при впрыске); q – доля теплового потока, не связанная с химическими реакциями; m_f , L_f и μ_j – соответственно масса жидкой фазы, теплота испарения и молекулярный вес j -го газового компонента; S_w , и l – мгновенное значение площади поверхности теплообмена и характерного размера камеры сгорания; γ и ε – отношение радиуса кривошипа к длине шатуна и геометрическая степень сжатия; α , T_w – усредненные коэффициент теплоотдачи, температура поверхности КС; D_f , $\Lambda = \Lambda(G)$ и $G(t)$ – коэффици-

ент диффузии паров топлива в вакуум, средний диаметр капель при распыливании форсункой и массовая скорость впрыска топлива; $\delta_{i,f}$ – символ *Кронекера*; R – универсальная газовая постоянная; I – приведенный момент инерции нагруженного ДВС; $P(\varphi)$, S_p и $r(\varphi)$ – соответственно мгновенное давление в камере сгорания, площадь поршня и функция передачи поступательного усилия во вращение; φ – угол поворота и $\Omega = d\varphi / dt$ – частота вращения коленвала; k_1 и k_2 – коэффициенты сопротивления вращению; k_B – постоянная *Больцмана*; прочие обозначения – общепринятые.

Комплекс f^* в уравнениях (1)-(11) позволяет учесть два параллельных канала химических превращений: f^{chem} – медленные реакции, протекающие синхронно во всех точках камеры сгорания как в реакторе идеального смешения, и f^{diff} – быстрые процессы во фронте пламени, темп которых ограничивается турбулентной диффузией. Поскольку в пламени реакции протекают при повышенной температуре: в нашей модели скачок полагается равным половине величины локальной адиабатической температуры $T_{ad}/2$. Кроме того, поскольку нет универсальной связи между коэффициентом турбулентной диффузии D_{turb} и числом Re , нами выбрана зависимость $D_{\text{turb}} \sim Re^{3/2}$, промежуточная между приближениями *мелко-* и *крупномасштабных* пульсаций – $D_{\text{turb}} \sim Re$ и $D_{\text{turb}} \sim Re^2$. Параметры S_w , l и Re являются конструктивно обусловленными функциями времени t .

Если ограничить осреднение (1)-(11) масштабом пламени, концентрация ряда токсичных компонентов в выхлопе получается заниженной. Это касается как продуктов неполного сгорания CO и C_xH_y , так и побочных продуктов окисления NO_x , выход которых обусловлен крупномасштабной параметрической неоднородностью заряда. В модели использовано предположение о делении за-

ряда на три параметрически однородные зоны: 1) с номинальным коэффициентом избытка воздуха $\alpha_1 = \alpha$, в которой сгорает x -я часть топлива ($0 < x < 1$); 2) с коэффициентом избытка воздуха $\alpha_2 = 0.7$, где сгорает $(1 - x)/2$ топлива; 3) с коэффициентом избытка воздуха $\alpha_3 = 2\alpha - 0.7$, где сгорает остальное топливо. Результирующая концентрация i -го компонента задается уравнением

$$\langle n_i \rangle = \frac{1}{2} (1 - x) n_i^{0.7} + x n_i^\alpha + \frac{1}{2} (1 - x) n_i^{2\alpha - 0.7}, \quad (12)$$

где верхний индекс при c_i соответствует локальному коэффициенту избытка воздуха. Для учета качества смесеобразования x используется зависимость

$$x = \text{th}[D_{\text{turb}} \sum n_i / (l^2 \sum |dn_i/dt|)], \quad (13)$$

в которой $\sum |dn_i/dt|$ и $D_{\text{turb}} \sum n_i / l^2$ являются характерными временами химического окисления и механического перемешивания заряда. Такое уточнение привело к согласию рассчитываемых величин n_i с известными из эксперимента данными.

Модель (1)-(13) позволяет надежно определять не только энергетические характеристики рабочего цикла различных типов ДВС, но также содержание в отработавших газах CO , C_xH_y , NO , $RCOH$, в т.ч. на переходных режимах.

Библиографический список

1. Бакулин, В.Н., Ладоса Е.Н., Потопахин В.А., Яценко О.В. Моделирование кинетики неравновесных физических процессов и реакций в многокомпонентном турбулентном заряде поршневых двигателей внутреннего сгорания / В.Н. Бакулин, Е.Н. Ладоса, В.А. Потопахин, О.В. Яценко // Математическое моделирование, Т. 19. № 12. 2007. - С. 81-97.

Работа выполнена при поддержке фонда ALCOA.