

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАБОЧЕГО ЦИКЛА БЕНЗИНОВОГО ДВИГАТЕЛЯ С РЕЦИРКУЛЯЦИЕЙ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ

М.А. Мацулевич, Е.А. Лазарев

MATHEMATIC MODEL OF THE WORKING CYCLE OF THE GASOLINE ENGINE WITH EXHAUST GAS RECIRCULATION

M.A. Maculevich, E.A. Lazarev

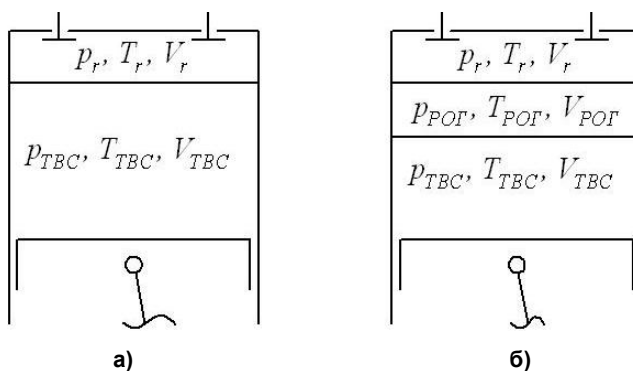
Приведен расчет физических констант рабочего тела и рабочего цикла бензинового двигателя при использовании рециркуляции отработавших газов.

Ключевые слова: рециркуляция отработавших газов, рабочий цикл, бензиновый двигатель.

Calculation of the physical constants of the working fluid and the operating cycle gasoline engine with exhaust gas recirculation is reduced.

Keywords: exhaust gas recirculation, working cycle, gasoline engine.

К числу устройств, влияющих на рабочий цикл бензинового двигателя, относится система рециркуляции отработавших газов (РОГ) [1, 2]. Перепускаемые во впускную систему отработавшие газы изменяют состав свежего заряда и его свойства. Представим объем свежего заряда (C_3) в виде двух парциальных объемов топливоздушнй смеси (ТВС) $V_{ТВС}$ и рециркулируемых отработавших газов $V_{РОГ}$ (см. рисунок).



Рабочее тело в цилиндре двигателя: а – без РОГ; б – с РОГ

Под степенью рециркуляции отработавших газов $k_{РОГ}$ будем понимать отношение объема рециркулируемых газов, содержащихся в свежем заряде, к объему свежего заряда:

$$k_{РОГ} = \frac{V_{РОГ}}{V_{ТВС} + V_{РОГ}}. \quad (1)$$

Для определения внутренней энергии смеси U_a примем процесс смешения адиабатическим и мольные теплоемкости $\mu C_{va} \approx \mu C_{vТВС} \approx \mu C_{vРОГ} \approx \mu C_{vr}$:

$$U_a = U_{ТВС} + U_{РОГ} + U_r; \quad (2)$$

$$T_a \cdot M_a = (T_{ТВС} + \Delta T_1) \cdot M_{ТВС} + (T_{РОГ} + \Delta T_2) \cdot M_{РОГ} + T_r \cdot M_r, \quad (3)$$

где T_a , M_a – соответственно температура и число молей рабочего тела в конце такта впуска; $(T_{TBC} + \Delta T_1)$, M_{TBC} – соответственно температура с учетом теплообмена со стенками и число молей топливовоздушной смеси, содержащейся в свежем заряде; $(T_{POG} + \Delta T_2)$, M_{POG} – соответственно температура с учетом теплообмена со стенками и число молей рециркулируемых газов, содержащихся в свежем заряде; T_r , M_r – соответственно температура и число молей остаточных газов.

Выражая число молей через параметры состояния газов, получаем

$$\frac{p_a \cdot V_a}{R} = \frac{(T_{TBC} + \Delta T_1) \cdot p_{TBC} \cdot V_{TBC}}{R \cdot T_{TBC}} + \frac{(T_{POG} + \Delta T_2) \cdot p_{POG} \cdot V_{POG}}{R \cdot T_{POG}} + \frac{p_r \cdot V_r}{R}. \quad (4)$$

Учитывая, что $V_h \cdot \eta_v = V_{TBC} + V_{POG}$, после ряда преобразований приводим уравнение (4) к следующему виду:

$$\eta_v = \frac{p_a \cdot V_a - p_r \cdot V_r}{V_h \cdot \left[\frac{(T_{TBC} + \Delta T_1) \cdot p_{TBC} \cdot (1 - k_{POG})}{T_{TBC}} + \frac{(T_{POG} + \Delta T_2) \cdot p_{POG} \cdot k_{POG}}{T_{POG}} \right]}. \quad (5)$$

Для определения давления в конце такта впуска решим уравнение (5) относительно p_a :

$$p_a = \frac{(\varepsilon - 1) \cdot \eta_v}{\varepsilon} \cdot \left[\frac{(T_{TBC} + \Delta T_1) \cdot p_{TBC} \cdot (1 - k_{POG})}{T_{TBC}} + \frac{(T_{POG} + \Delta T_2) \cdot p_{POG} \cdot k_{POG}}{T_{POG}} \right] + \frac{p_r}{\varepsilon}, \quad (6)$$

где p_a – давление в конце такта впуска; p_{TBC} – давление топливовоздушной смеси; p_{POG} – давление рециркулируемых газов; p_r – давление остаточных газов; ε – степень сжатия.

Свежий заряд содержит топливовоздушную смесь и рециркулируемые отработавшие газы, тогда коэффициент остаточных газов определим:

$$\gamma = \frac{M_r}{M_{TBC} + M_{POG}}. \quad (7)$$

Учитывая, что $V_{TBC} = (1 - k_{POG}) \cdot V_h \cdot \eta_v$, $V_{POG} = k_{POG} \cdot V_h \cdot \eta_v$, $V_r = V_c$, перепишем равенство (7):

$$\gamma = \frac{p_r \cdot T_{TBC} \cdot T_{POG}}{\eta_v \cdot (\varepsilon - 1) \cdot (T_r \cdot T_{POG} \cdot p_{TBC} \cdot (1 - k_{POG}) + T_r \cdot T_{TBC} \cdot p_{POG} \cdot k_{POG})}. \quad (8)$$

Запишем уравнение теплового баланса для свежего заряда, смешанного с остаточными газами, и с учетом подогрева свежего заряда от горячих поверхностей впускного тракта и цилиндро-поршневой группы:

$$\Delta U_{TBC} + \Delta U_{POG} = \Delta U_r + \Delta Q_{TBC} + \Delta Q_{POG}, \quad (9)$$

где ΔU_{TBC} , ΔU_{POG} – изменение внутренней энергии топливовоздушной смеси и рециркулируемых газов соответственно; ΔU_r – изменение внутренней энергии остаточных газов; ΔQ_{TBC} , ΔQ_{POG} – теплота подведенная (отведенная) к свежему заряду и рециркулируемым отработавшим газам от стенок цилиндра. Воспользовавшись законом Джоуля, после некоторых преобразований получаем

$$T_a = \frac{T_r \cdot \gamma + (T_{TBC} + \Delta T_1) \cdot K_1 + (T_{POG} + \Delta T_2) \cdot K_2}{1 + \gamma}, \quad (10)$$

где K_1 и K_2 – константы, которые определяются по следующим зависимостям:

$$K_1 = \frac{p_{TBC} \cdot (1 - k_{POG}) \cdot T_{POG}}{p_{TBC} \cdot (1 - k_{POG}) \cdot T_{POG} + p_{POG} \cdot k_{POG} \cdot T_{TBC}};$$

$$K_2 = \frac{p_{POG} \cdot k_{POG} \cdot T_{TBC}}{p_{TBC} \cdot (1 - k_{POG}) \cdot T_{POG} + p_{POG} \cdot k_{POG} \cdot T_{TBC}}.$$

Процессы сжатия и расширения рассчитываются по уравнениям политропного процесса. Показатель политропы сжатия (расширения) определяется по зависимостям [3].

Удельная использованная теплота сгорания, отнесенная к одному килограмму топлива, рассчитывается по следующей зависимости:

Расчет и конструирование

$$q = \frac{\xi \cdot Hu}{(1 + \gamma) \cdot (\alpha \cdot L'_0 + 1) \cdot (1 + K_3)} \cdot x, \quad (11)$$

где $K_3 = \frac{k_{POG}}{1 - k_{POG}} \cdot \frac{p_{POG} \cdot R_{TBC} \cdot T_{TBC}}{p_{TBC} \cdot R_{POG} \cdot T_{POG}}$; R_{TBC} и R_{POG} – газовые постоянные для ТВС и РОГ; x – доля топлива, выгоревшего к текущему моменту; α – коэффициент избытка воздуха; L'_0 – теоретическое количество воздуха для сжигания одного килограмма топлива.

Для расчета доли выгоревшего топлива в бензиновом двигателе используем уравнение И.И. Вибе [4]:

$$x = 1 - e^{-6,908 \left(\frac{t}{t_z}\right)^{m+1}}, \quad (12)$$

где t , t_z – текущий момент сгорания и продолжительность сгорания соответственно; m – показатель характера сгорания.

Определяя R_{TBC} , допустим, что распыленное топливо внутри цилиндра двигателя полностью находится в газообразной фазе:

$$R_{TBC} = \frac{\alpha \cdot L'_0}{\alpha \cdot L'_0 + 1} \cdot \frac{R}{\mu_B} + \frac{1}{\alpha \cdot L'_0 + 1} \cdot \frac{R}{\mu_T}, \quad (13)$$

где μ_B , μ_T – молекулярная масса воздуха и топлива; R – универсальная газовая постоянная.

Определим газовую постоянную рециркулируемых отработавших газов как $R_{POG} = \frac{R}{\mu_{OG}}$,

где μ_{OG} – молекулярная масса отработавших газов.

Для зависимости (11) выполняются следующие условия:

1. При отсутствии рециркуляции удельная теплота имеет максимальное значение (при других неизменных параметрах). Это объясняется тем, что в рабочем теле присутствует максимальное количество топливовоздушной смеси.

2. В случае, когда степень рециркуляции стремится к 100 %, удельная использованная теплота сгорания стремится к 0 МДж/кг, так как заряд, поступающий на такте впуска, состоит только из рециркулируемых отработавших газов.

Учитывая, что удельный объем рабочего тела $v_a = \frac{V_a}{G_a}$, а V_a , G_a – объем и масса рабочего

тела в начале процесса сжатия, получаем:

$$v_a = R \cdot \frac{T_a}{p_a} \cdot \frac{\left[\left(\frac{\alpha \cdot L'_0}{\mu_B} + \frac{1}{\mu_T} \right) \cdot (1 + K_4) \right]}{\left(\alpha \cdot L'_0 + 1 \right) \cdot (1 + K_3)}, \quad (14)$$

где $K_4 = \frac{k_{POG}}{1 - k_{POG}} \cdot \frac{p_{POG} \cdot T_{TBC}}{p_{TBC} \cdot T_{POG}}$.

Коэффициент молекулярного изменения определится по формуле

$$\beta_0 = \frac{M_{np.c2}}{M_{TBC} + M_{POG}} = \frac{M_{TBC} + M_{POG} + \Delta M}{M_{TBC} + M_{POG}} = 1 + \frac{\Delta M}{M_{TBC} + M_{POG}}, \quad (15)$$

где $M_{np.c2}$ – число молей продуктов сгорания; M_{TBC} – число молей топливовоздушной смеси; M_{POG} – число молей рециркулируемых отработавших газов; ΔM – изменение числа молей свежего заряда после сгорания.

Число молей продуктов сгорания представим как сумму молей сгоревшей топливовоздушной смеси $M_{c2.ч}$ и молей рециркулируемых газов M_{POG} , поскольку в процессе сгорания отработавшие газы не участвуют в процессе химического превращения.

$$\Delta M = M_{c2.ч} + M_{POG} - M_{TBC} - M_{POG} = M_{c2.ч} - M_{TBC}. \quad (16)$$

Максимальное значение коэффициента молекулярного изменения:

$$\beta_{0\max} = 1 + \frac{\frac{H}{4} + \frac{O}{32} - \frac{1}{\mu_T}}{\left(\alpha \cdot L_0 + \frac{1}{\mu_T}\right) \cdot (1 + K_4)} \quad \text{для } \alpha \geq 1; \quad (17)$$

$$\beta_{0\max} = 1 + \frac{\frac{H}{4} + \frac{O}{32} + 0,21 \cdot (1 + \alpha) \cdot L_0 - \frac{1}{\mu_T}}{\left(\alpha \cdot L_0 + \frac{1}{\mu_T}\right) \cdot (1 + K_4)} \quad \text{для } \alpha \leq 1. \quad (18)$$

Действительный коэффициент молекулярного изменения как отношение числа молей рабочего тела после сгорания к числу молей рабочего тела до сгорания составляет:

$$\beta_{\max} = \frac{M_{TBC} + M_{POG} + \Delta M + M_r}{M_{TBC} + M_{POG} + M_r} = \frac{\beta_{0\max} + \gamma}{1 + \gamma}. \quad (19)$$

Давление рабочего тела определяем по зависимости, предложенной А.Н. Лавриком [5]:

$$p_2 = \frac{\beta_2}{\beta_1} \cdot \left(\frac{p_1 \cdot q_z \cdot (k_{cp} - 1) \cdot \mu_{cp} \cdot \Delta x}{0,008314 \cdot T_1} + p_1 \right) \cdot \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{k_{cp}}, \quad (20)$$

где $\mu_{cp} = \frac{\mu_2 + \mu_1}{2}$ – среднее значение молекулярной массы рабочего тела на расчетном участке,

$k_{cp} = \frac{k_2 + k_1}{2}$ – среднее значение отношения теплоемкостей на расчетном участке; Δx , p_1 , p_2 , β_1 , β_2 ,

v_1 , v_2 – разница долей выгоревшего топлива, давление, коэффициенты молекулярного изменения, удельные объемы на расчетном участке; q_z – общая используемая теплота сгорания.

Для определения текущей молекулярной массы в процессе сгорания топлива воспользуемся формулой $\mu = \frac{\mu_{PT}}{\beta}$, а для расчета кажущейся молекулярной массы рабочего тела в конце процес-

са сжатия – зависимостью

$$\mu_{PT} = \frac{0,008314 \cdot T_y}{p_y \cdot v_y}. \quad (21)$$

Расчет текущей температуры рабочего тела ведется параллельно с определением текущего давления PT по уравнению [5]:

$$T_1 = \frac{p_1 \cdot v_1 \cdot \mu_{PT}}{0,08314 \cdot \beta_1}, \quad (22)$$

где p_1 , v_1 , β_1 , μ_{PT} – соответственно давление, удельный объем, коэффициент молекулярного изменения и кажущаяся молекулярная масса рабочего тела в начале расчетного участка.

Литература

1. Материалы LI международной научно-технической конференции «Достижение науки – агропромышленному производству» / под ред. д-ра техн. наук, проф. Н.С. Сергеева. – Челябинск: ЧГАА, 2012. – Ч. IV. – С. 201–206.
2. Fontana, G. Experimental analysis of a spark-ignition engine using exhaust gas recycle at WOT operation / G. Fontana, E. Galloni // Applied Energy. – 2010. – Vol. 87. – P. 2187–2193.
3. Расчет и конструирование автомобильных и тракторных двигателей: учеб. пособие для вузов / Б.Е. Железко, В.М. Адамов, И.К. Русецкий, Г.Я. Якубенко. – Минск: Высш. шк., 1987. – 247 с.
4. Кавтарадзе, Р.З. Теория поршневых двигателей. Специальные главы: учеб. для вузов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 720 с.

Расчет и конструирование

5. Лаврик, А.Н. *Расчет и анализ рабочего цикла ДВС на различных топливах: моногр.* / А.Н. Лаврик. – Иркутск: Изд-во Иркут. гос. ун-та, 1985. – 104 с.

Поступила в редакцию 15 августа 2012 г.

Мацулевич Михаил Андреевич. Аспирант кафедры «Двигатели внутреннего сгорания», Южно-Уральский государственный университет. Область научных интересов – рабочий цикл двигателей внутреннего сгорания с рециркуляцией отработавших газов. E-mail: mmaculevich@mail.ru

Mihail A. Maculevich. Postgraduate student of the Internal Combustion Engine department, South Ural State University. The area of scientific interests – working cycle of the internal combustion engine with exhaust gas recirculation. E-mail: mmaculevich@mail.ru

Лазарев Евгений Анатольевич. Доктор технических наук, профессор каф. «Двигатели внутреннего сгорания», Южно-Уральский государственный университет. Область научных интересов – рабочий цикл двигателей внутреннего сгорания. E-mail: lea2@mail.ru

Evgeny A. Lazarev. Doctor of engineering science, professor of the Internal Combustion Engine department, South Ural State University. The area of scientific interests – working cycle of the internal combustion engine. E-mail: lea2@mail.ru