

УДК 621.181.7

Ю.В. КУРІС¹ (канд.техн.наук), І.Ф. ЧЕРВОНІЙ² (д-р техн.наук, проф.),
С.М. САФЬЯНЦ³ (д-р техн.наук, проф.)

¹ Інститут вугільних енерготехнологій НАН України

² Запорізька державна інженерна академія

³ Донецький національний технічний університет
safyants_sm@mail.ru

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ РОБОТИ ДВИГУНА НА БІОПАЛИВІ

Розглянуто використання біогазу як палива для дизельних двигунів на металургійних підприємствах і виконаний теоретичний аналіз основних режимів роботи двигуна.

Проектування та оптимізація двигунів внутрішнього згорання, які використовуються на металургійних підприємствах, особливо при використанні біогазу у якості палива, вимагає застосування передових методів дослідження [1-5]. В даний час, застосовують експериментальні та теоретичні методи при дослідженні процесів роботи двигунів. У зв'язку з особливістю горіння біогазу, такий підхід є необхідним для оптимізації процесу проектування. У процесах розрахунку двигун розглядається як складна термодинамічна система, що складається з декількох підсистем, які обмінюються між собою і з навколишнім середовищем теплотою, роботою і масою. Простір циліндра розглядається, в загальному випадку, як відкрита термодинамічна система змінного об'єму. У процесах стиснення і розширення простір циліндра розглядається як замкнута термодинамічна система [1, 5].

При розрахунку процесів в циліндрі двигуна допускають, що стан робочого тіла в циліндрі повністю рівноважний. В якості робочого тіла у всіх термодинамічних розрахунках процесів двигуна беруть ідеальний газ. При нормальній роботі двигуна (без детонації) дотримується механічне рівновагу (рівність тисків у всіх зонах) в циліндрі, приймається термічна і термодинамічна однорідність, так як неоднорідність не призводить до суттєвих відхилень результатів від дійсних при математичному моделюванні процесів.

Фізико-хімічні властивості палива. Відсутність хімічних зв'язків між горючими компонентами в газовому паливі дозволяє розраховувати теплоту згорання газового палива за принципом адитивності. Якщо об'ємне процентний вміст компонента (при нормальних умовах: 273,16 К і 101 кПа) позначити його хімічною формулою, то розрахункова величина нижчої теплоти згорання Q_H сухого газоподібного палива дорівнює сумі добутків теплоти згорання i -го компонента і його процентного вмісту у паливі, кДж/м^3

$$Q_H = 108[H_2] + 126,3[CO] + 358,2[CH_4] + 560,5[C_2H_2] + 637,3[C_2H_6] + 912,3[C_3H_8] + 1186,2[C_4H_{10}] + 1460[C_5H_{12}] + 590,6[C_2H_4] + 859,8[C_3H_6] + 1134[C_4H_8] + 1404[C_6H_6] + 235[H_2S]. \quad (1)$$

Отже, нижча теплота згорання біогазу виражається за формулою:

$$Q_H = 108[H_2] + 126,3[CO] + 358,2[CH_4] + 235[H_2S], \text{кДж/м}^3. \quad (2)$$

Так як біогаз, отримуваний в установці, не містить сірководень, його теплотворна здатність можна представити у вигляді:

$$Q_H = 108[H_2] + 126,3[CO] + 358,2[CH_4], \text{кДж/м}^3. \quad (3)$$

При роботі двигуна на біогазі необхідно враховувати зміст всіх складових компонентів. Біогаз, зазвичай, містить горючі компоненти: метан - CH_4 , водень - H_2 , кисень - O_2 , оксид вуглецю - CO , сірководень - H_2S і негорючі компоненти: вуглекислий газ - CO_2 і азот - N_2 .

Молекулярна маса біогазу визначається за формулою

$$\mu_T = \sum_{i=1}^n (\mu_{C_xH_yO_z})_i \cdot r_i + \sum_{j=1}^m \mu_j \cdot r_j, \quad (4)$$

де $(\mu_{C_xH_yO_z})_i$, μ_j - молярна маса i -го та j -го вуглеводневого та іншого компонента; r_i , r_j - об'ємна, масова, відповідно, частка складових компонентів палива. Тоді

$$\mu_T = \mu_{CH_4} \cdot r_{CH_4} + \mu_{CO} \cdot r_{CO} + \mu_{H_2} \cdot r_{H_2} + \mu_{O_2} \cdot r_{O_2} + \mu_{N_2} \cdot r_{N_2} + \mu_{CO_2} \cdot r_{CO_2}. \quad (5)$$

© Куріс Ю.В., Червоний І.Ф., Сафьянц С.М., 2011

Кількість горючих компонентів у біогазі

$$\Sigma r'_{\text{гор}} = r_{\text{CH}_4} + r_{\text{CO}} + r_{\text{H}_2} + r_{\text{O}_2} \quad (6)$$

приймаючи, що дійсна кількість горючих буде

$$r_{\text{CH}_4}^d = \frac{r_{\text{CH}_4}}{\Sigma r_{\text{гор}}}, \quad r_{\text{H}_2}^d = \frac{r_{\text{H}_2}}{\Sigma r_{\text{гор}}}, \quad r_{\text{CO}} = \frac{r_{\text{CO}}}{\Sigma r_{\text{гор}}}, \quad \text{за умовами, що } r_{\text{CH}_4}^d + r_{\text{H}_2}^d + r_{\text{CO}}^d = 1.$$

Дійсна молекулярна маса горючого газу

$$\mu_T^d = \mu_{\text{CH}_4} \cdot r_{\text{CH}_4}^d + \mu_{\text{H}_2} \cdot r_{\text{H}_2}^d + \mu_{\text{CO}} \cdot r_{\text{CO}}^d. \quad (7)$$

Нехтуючи кількістю сірководню (H_2S) нижча теплота біогазу приймає вигляд

$$H'_u = 12,8 r_{\text{CO}}^d + 10,8 r_{\text{H}_2}^d + 35,7 r_{\text{CH}_4}^d. \quad (8)$$

Реакція окислення біогазу (при $\alpha \geq 1$)

1. $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$;
2. $\text{CO} + 0,5\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$;
3. $\text{H}_2 + 0,5\text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$;
4. $\text{H}_2\text{S} + 1,5\text{O}_2 \rightarrow \text{SO}_2 + \text{H}_2\text{O}$.

Загальна схема стехіометричної реакції представляється у вигляді



Теоретично необхідну кількість повітря для спалювання 1 моля газового палива визначається за формулою (mol/mol или m^3/m^3):

$$L_0 = \frac{1}{0,21} \left[\frac{\text{CO}}{2} + \frac{\text{H}_2}{2} + \left(n + \frac{m}{4} \right) \cdot \text{C}_n\text{H}_m + 2\text{CH}_4 - \text{O}_2 \right]. \quad (11)$$

Мольна частка пального у стехіометричній суміші визначається по відношенню

$$\chi_{\text{гор}} = 1 / (1 + v), \quad (12)$$

де v - стехіометричний коефіцієнт, що враховує число молей кисню, необхідних для повного згорання палива (згідно рівняння (10) стехіометричний коефіцієнт $v=4,5$).

При згорянні біогазу, окислювачем є повітря, що містить 21 % кисню, 78 % азоту і 1 % інших газів. Потрібно також враховувати, що в біогазі містяться негорючі газу (вуглекислий газ і азот).

Загальна кількість повітря (з урахуванням одиниці об'єму повітря)

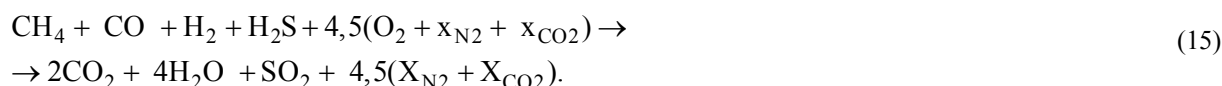
$$r_{\text{пов}} = \text{O}_2 + \text{N}_2 + \Sigma r_{\text{негор}} = 1 + \Sigma r_{\text{негор}}. \quad (13)$$

Частка складових газів в повітрі

$$\text{O}'_2 = \frac{0,21}{1 + \Sigma r_{\text{негор}}}, \quad \text{N}'_2 = \frac{0,79 + r_{\text{N}_2}}{1 + \Sigma r_{\text{негор}}}. \quad (14)$$

Молярний частки для стехіометричної суміші з повітрям

Отже, в рівняння реакції (10) повинні бути додані відповідні кількості N_2 та CO_2 . Тоді рівняння прийме вигляд



Стехіометричне число визначається за формулою

$$\left(\frac{A}{F} \right)_S = v \cdot \frac{\mu_{\text{повітр}}}{\mu_{\text{палив}}} = \frac{v \cdot (\text{O}_2 + x_{\text{N}_2} \cdot [\text{N}_2] + x_{\text{CO}_2} \cdot [\text{CO}_2])}{[\text{CH}_4] + [\text{CO}] + [\text{H}_2] + [\text{H}_2\text{S}]} = \frac{v}{80} (32 + 28x). \quad (16)$$

Попередньо суміш пального і повітря характеризується величиною еквівалентного відносини для повітря

$$\lambda = \frac{\left(\frac{x_{\text{пов}}}{x_{\text{пал}}} \right)}{\left(\frac{x_{\text{пов.стех}}}{x_{\text{пал.стех}}} \right)}, \quad (17)$$

$$\text{де } \left(\frac{x_{\text{пов.стех}}}{x_{\text{пал.стех}}} \right) = \left(\frac{A}{F} \right)_S.$$

Кількість біогазу, що надходить в циліндр визначається за формулою

$$x_{\text{гор}} = \frac{x_{\text{пов}}}{\left(\frac{A}{F} \right)_S}. \quad (18)$$

Процеси у циліндрі. Процеси стиску, згорання і розширення описують диференціальним рівнянням першого закону термодинаміки для закритої термодинамічної системи. Рівняння вирішується спільно з рівнянням стану ідеального газу в наступному вигляді:

$$\left. \begin{aligned} dU &= \chi \cdot H_u \cdot g_{\text{т.ц}} dx - dQ_w - pdV \\ pV &= MRT \end{aligned} \right\}, \quad (19)$$

де χ - коефіцієнт тепловиділення; H_u - нижча теплота згорання палива; $g_{\text{т.ц}}$ - циклова подача палива; dQ_w - тепловіддача в стінки.

При постійному процесі горіння (постійна подача палива)

$$dU = d(M_{\text{см}} \cdot u) = M_{\text{см}} \cdot du.$$

Але

$$M_{\text{см}} = M_{\text{пц}} + M_{\text{г}} = M_{\text{пц}} \cdot g_{\text{п.ц}} \cdot (1 + \gamma),$$

де $\gamma = M_{\text{г}} / M_{\text{пц}}$ - коефіцієнт залишкових газів;

$M_1 = (\alpha L_0 + 1)$ - маса свіжого заряду, підрахована для 1 кг палива;

Після постановки та перетворення (19) набуде вигляду:

$$dU = \frac{\chi \cdot H_u}{M_1 \left(1 + \frac{\gamma}{\mu_0} \right)} dx - \frac{1}{M} (dQ_w + pdV). \quad (20)$$

У функціях $U = U(T, g_a)$ і $u = u(T, g_a)$ складова g_a відображає масову частку свіжого заряду і визначається за виразом $g_a = M_{\text{сз}} / M_{\text{см}}$. Враховуючи, що внутрішня енергія ідеально-газової суміші (U) є функцією двох змінних - температури і параметра складу суміші, рівняння (20) можна переписати у вигляді

$$du = \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_{g_a} dT + \left(\frac{\partial u}{\partial g_a} \right)_T dg_a. \quad (21)$$

Згідно з принципом адитивності, внутрішня енергія суміші газів являє собою суму внутрішньої енергії незгорілої свіжої суміші $U_{1x} = u_{\text{сз}} M_{1x}$, і внутрішньої енергії продуктів згорання палива $U_{2x} = u_{\text{пз}} M_{2x}$ умісти з внутрішньою енергією залишкових газів $U_{1x} = u_{\text{сз}} M_{1x}$. Отже,

$$U_{\text{см}} = u_{\text{см}} \cdot M_{\text{см}} = u_{\text{сз}} \cdot \Pi_{1x} + u_{\text{п.с}} (M_{2x} + M_{\text{г}})$$

де $u_{\text{см}}$, $u_{\text{сз}}$ та $u_{\text{п.с}}$ - внутрішня енергія свіжої суміші, свіжого заряду і продуктів згорання, відповідно. Розділивши (21) на масу робочої суміші і визначивши

$$g_a = \frac{M_{1x}}{M_{\text{см}}} \quad \text{та} \quad g_{\text{г}} = \frac{(M_{2x} + M_{\text{г}})}{M_{\text{см}}},$$

одержимо

$$u_{\text{см}} = (u_{\text{сз}} \cdot g_a + u_{\text{п.с}} \cdot g_{\text{г}}) = (c_{\text{в.сз}} \cdot g_a + c_{\text{в.п.с}} \cdot g_{\text{г}}) \cdot T, \quad (22)$$

де $c_{\text{в.сз}}$ та $c_{\text{в.п.с}}$ - питома теплоємність свіжого заряду і продуктів згорання при постійному об'ємі, відповідно. Масова частка свіжого заряду в газовій суміші при $M_{\text{см}} = \text{const}$, дорівнює

$$dg_a = d\left(\frac{M_{ix}}{M_{cm}}\right) = -\frac{dx}{(1+\gamma)} \quad (23)$$

Характеристика тепловиділення описується за формулою І.І. Вібе:

$$x = 1 - \exp\left[\ln(1-x_z) \cdot \left(\frac{t}{t_z}\right)^{m+1}\right], \quad (24)$$

де $\ln(1-x_z)=C$ - коефіцієнт, що враховує частку згорілого палива до моменту Z (кінця згоряння); t , t_z - кути, поточного і кінця згоряння (момент Z), відповідно; m - характеристика згоряння (визначається за індикаторним діаграм).

Висновки

1. Аналіз процесу роботи двигуна, що працює на біогазі дає можливість визначити технічно доцільні конструктивні параметри двигуна при найменших затратах праці і ресурсів.

2. До біогазу, що застосовується в якості моторного палива, пред'являється ряд вимог, таких як знижені концентрації азоту й сірки. При виробництві біогазу цього можна досягти зброджуванням гною в термофільному режимі.

ЛІТЕРАТУРА

1. Майстренко О.Ю. Обґрунтування використання низькокалорійних палив у ДВС та особливості спалювання біогазу в ДВС / О.Ю. Майстренко, Ю.В. Куріс, В.М. Власенко // Фаховий журнал «Енергозбереження, енергетика, энергоаудит». – 2010. – №1. – С. 46-50.

2. Куріс Ю.В. Механізм утворення шкідливих домішок у продуктах згорання біогазу та природного газу біомаси / Ю.В. Куріс, А.В. Рубан // Матеріали міжвузівської наукової конференції ЗГПА «Сучасні екологічні проблеми – IV» м. Запоріжжя. – 2010. – С. 229-230.

3. Майстренко О.Ю. Біогазові установки та методи їх розрахунку / О.Ю. Майстренко, Ю. В. Куріс, О.В. Ряснова // Міжнародна конференція «Наука і Inowacja 2009». Poland. – 2009. – С. 6-14.

4. Ткаченко С.І. Удосконалення технології спалювання біогазу отриманого при процесах біоконверсії / С.І. Ткаченко, Д.В. Степанов, Ю.В. Куріс, А.В. Несторенко // Фаховий журнал «Новини Енергетики». – 2007. – №2. – С. 36-42.

5. Ткаченко С.І. Зменшення шкідливих викидів в навколишнє середовище в підсистемах енергозабезпечення систем біоконверсії: звіт по науково дослідній роботі / С. І. Ткаченко, Д. В. Степанов, Ю.В. Куріс. - ВНТУ. – 2006.

Надійшла до редколегії 26.09.2010

Рецензент: П.П. Говоров

Ю.В. КУРИС¹, И.Ф. ЧЕРВОНЫЙ², С.М. САФЬЯНЦ³

¹ Інститут угільних енерготехнологій НАН України

² Запорізька державна інженерна академія

³ Донецький національний технічний університет

Y. KURIS¹, I. CHERVONIY², S. SAFYANTS³

¹ Institute of Coal Power of Ukraine NAS

² Zaporizhzhya State Engineering Academy

³ Donetsk National Technical University

Теоретические основы работы двигателя на биотопливе. Рассмотрено использование биогаза в качестве топлива для дизельных двигателей на металлургических предприятиях и выполнен теоретический анализ основных режимов работы двигателя.

Theoretical Fundamentals of Engine Working On Biofuel. The use of biogas as a fuel for diesel motors at metallurgical enterprises has been considered and theoretical analysis of main modes of the motors has been performed.