

ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ І СИСТЕМ ЕНЕРГЕТИКИ

УДК 536.7

О. А. ШРАЙБЕР, д-р техн. наук, В. П. ЯЦЕНКО, канд. техн. наук
Інститут загальної енергетики НАН України, м. Київ

ВИКОРИСТАННЯ ТЕПЛОВИХ ВТОРИННИХ ЕНЕРГОРЕСУРСІВ МЕТОДОМ ТЕРМОХІМІЧНОЇ РЕГЕНЕРАЦІЇ У ДВИГУНІ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ

Запропоновано схему використання теплоти відпрацьованих газів двигуна внутрішнього згоряння, що працює на природному газі, за допомогою термохімічної регенерації. Схема дозволяє забезпечити утворення безкисневого реагенту для конверсії палива, що значно підвищує її ефективність. Розроблено метод термодинамічного розрахунку відповідної установки.

Ключові слова: термохімічна регенерація, відпрацьовані гази, двигун внутрішнього згоряння, конвертоване паливо, термодинамічний розрахунок.

Відпрацьовані гази різноманітних теплоенергетичних і теплотехнологічних установок, що працюють на природному газі, у багатьох випадках мають досить високу температуру, і тому пошук шляхів використання їх фізичної теплоти є важливою задачею енергозбереження. Найбільш поширений варіант тут пов'язаний із нагріванням повітря, що подається на спалювання, але він має, як мінімум, два недоліки: 1) кількість повітря і його питома теплоємність менше, ніж відповідні параметри продуктів згоряння (ПЗ); 2) з підвищенням температури повітря зростає емісія NO_x . Крім того, є випадки, коли нагрівання повітря взагалі неприпустиме, наприклад, для двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ). Тут єдиним способом використання теплоти ПЗ є метод термохімічної регенерації (ТХР) [1]. Його основним елементом є ендотермічна реакція вихідного палива (вважаємо, що воно складається з чистого метану) із відповідним окислювачем — найбільш просто і зручно з продуктами згоряння. У цій роботі розробляється схема використання ТХР для ДВЗ та метод її термодинамічного розрахунку.

© О.А. ШРАЙБЕР, В.П. ЯЦЕНКО, 2013

Як відомо [1], присутність кисню в реагенті процесу конверсії помітно знижує його показники. Тому, якщо двигун працює з певним надлишком повітря ($\alpha > 1$), то при розробленні схеми використання методу ТХР доцільно тим чи іншим способом видалити кисень із реагенту. Один із можливих варіантів наведено на рис. 1 (характерні точки позначені літерами у кружечках). Продукти згоряння після двигуна надходять у теплообмінник 3, де нагріваються за рахунок фізичної теплоти конвертованого палива (КП). Далі ПЗ розділяються на два потоки: А і В, і перший із них подається у камеру згоряння 4. Туди також надходить певна (невелика) частина утвореного в реакторах 5 і 6 конвертованого палива (речовина С). Потоки А і С підбираються таким чином, щоб на спалювання КП із потоку С було повністю витрачено весь кисень, що міститься у потоці А, і в результаті утворюється газова суміш із досить високою температурою, що не містить кисню (на рис. 1 позначена як ПЗ'). Ця речовина через високотемпературний реактор 5 надходить на змішування з природним газом. Далі утворена реагуюча суміш розділяється на потоки Е і F, що подаються у реактори 5 і 6 відповідно. Конвертовані палива з обох реакторів змі-

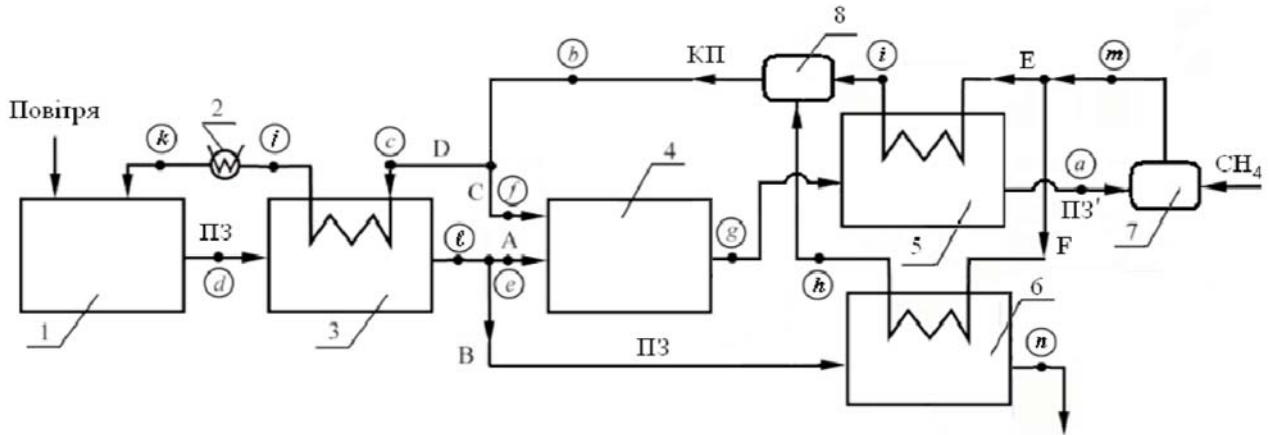


Рис. 1. Схема установки для використання теплоти відпрацьованих газів ДВЗ: 1 – ДВЗ; 2 – холодильник; 3 – теплообмінник; 4 – камера згоряння; 5 – «високотемпературний» реактор; 6 – «низькотемпературний» реактор; 7, 8 – змішувачі; ПЗ – продукти згоряння без кисню

щуються, і утворене остаточне КП розділяється на потоки С і D.

Таким чином, розроблена схема дозволяє підвищити ступінь конверсії не тільки за рахунок видалення кисню із реагенту, а і через підвищення температури теплоносіїв перед термімічними реакторами. Тут необхідно відзначити, що це досягається шляхом спалювання певної частини КП у камері згоряння 4, і, отже, *a priori* неочевидно, чи дасть ця схема помітну економію палива. Тому побудуємо рівняння матеріального балансу елементів схеми.

Позначимо через z частки КП і ПЗ після апарата 3, що надходять до камери згоряння (потоки С і А). Вважаючи, що реакція конверсії стехіометрична (якщо ні, то зміни алгоритму непринципові), маємо такий склад суміші газів (GMC – gas mixture composition) в точці a (рис. 1) на 1 кмоль вихідного палива:

$$GMC_a = \frac{1}{3}CO_2 + \frac{2}{3}H_2O + wN_2 \quad (1)$$

(кількість азоту заздалегідь невідома). Як відомо, склад КП (тобто ступінь конверсії ϕ) не впливає на склад продуктів його згоряння, тому далі для скорочення запису умовно вважаємо $\phi = 1$. Тоді

$$GMC_b = \frac{4}{3}CO + \frac{8}{3}H_2 + wN_2;$$

$$GMC_c = (1-y) \left(\frac{4}{3}CO + \frac{8}{3}H_2 + wN_2 \right).$$

Останнє паливо згоряє у ДВЗ з певним коефіцієнтом надлишку повітря α , і в результаті матимемо у точці d

$$GMC_d = (1-y) \left[\frac{4}{3}CO_2 + \frac{8}{3}H_2O + 2(\alpha - 1)O_2 + (w + 7,52\alpha)N_2 \right] \quad (2)$$

та у точці e

$$GMC_e = z GMC_d. \quad (3)$$

З іншого боку, склад речовини у точці f такий:

$$GMC_f = y \left(\frac{4}{3}CO + \frac{8}{3}H_2 + wN_2 \right).$$

Зрозуміло, що камера 4 повинна працювати без надлишку окислювача. Тоді, щоб повністю спалити потік С, необхідно витратити $2y$ кіломолярів кисню, але згідно з (2), (3) кількість кисню, що надходить до камери з потоком А, становить $2z(1-y)(\alpha - 1)$ кіломолярів. Отже, отримуємо перше рівняння для невідомих y, z, w :

$$z(1-y)(\alpha - 1) = y. \quad (4)$$

Тепер визначимо склад речовини у точці g . Сюди надходять ПЗ із точки e (див. (2), (3)), але без кисню, а також продукти стехіометричного згоряння КП із точки f :

$$GMC_g = [z(1-y) + y] \left(\frac{4}{3}CO_2 + \frac{8}{3}H_2O \right) + [(7,52\alpha + w)z(1-y) + yw]N_2. \quad (5)$$

Але, як видно з рис. 1, GMC_g повинен дорівнювати GMC_a , і тому з (1), (5) отримуємо ще два рівняння:

$$4[z(1-y) + y] = 1; \quad (6)$$

$$(7,52\alpha + w)z(1-y) + yw = w. \quad (7)$$

Розв'язок системи (4), (6) завжди існує та єдиний:

$$y = 0,25(\alpha - 1)/\alpha; \quad z = (3\alpha + 1)^{-1}. \quad (8)$$

Наприклад, при $\alpha = 1,2$ маємо $y = 0,04167$; $z = 0,2174$, а при $\alpha = 1,1$ — $y = 0,02273$; $z = 0,2326$. Підставляючи (8) у (7), отримуємо $w = 7,52/3$ незалежно від α . Відзначимо, що цей результат далеко не очевидний. Дійсно, потік А містить зайвий (у порівнянні зі стехіометричним спалюванням) азот, і, отже, на перший погляд, w повинно зростати з α . Але у продуктах згоряння потоку С азоту дуже мало, оскільки тут окислювачем є не повітря, а продукти згоряння із ДВЗ. В результаті склад реагенту (точка a) такий самий, як і в традиційних схемах.

Опишемо стисло метод термодинамічного розрахунку даної схеми. Використовуємо такі самі позначення, як і в [2], та вважаємо, що втрати теплоти в усіх апаратах і трубопроводах можна нехтувати. Для кожного варіанта розрахунку вводяться такі вихідні дані: α , T_d , T_h , T_i , T_j , T_k , частка ν реагуючої суміші, що подається в реактор 5, а також коефіцієнти у формулах для істинної теплоємності семи речовин, що розглядаються: CH_4 , N_2 , H_2 , CO_2 , CO , H_2O , O_2 [2]. Перш за все за допомогою програми EQSO4 [1] розраховується процес конверсії в реакторах 5 і 6 (рис. 1). Далі обчислюються параметри КП в точці b , після змішування потоків з обох реакторів (температура, хімічний склад, калорійність, ентальпія та повна ентальпія). Оскільки теплоємність речовин, що розглядаються, істотно змінюється з температурою, для знаходження T_b будується ітераційний

процес, описаний в [2].

Наступним етапом є розрахунок теплообмінника 3: всі параметри в точках c , d , j відомі, і легко обчислити ентальпію та температуру продуктів згоряння в точці l . Будується енергетичний баланс камери згоряння 4, що дає можливість знайти всі параметри у точці g . Тепер розраховується реактор 5. Тут теж необхідно побудувати ітераційний процес: задаємо певну $T_a^{(1)}$ (верхній індекс — номер ітерації), обчислюємо відповідну ентальпію $I_a^{(1)}$ та параметри в точці m , із рівняння енергетичного балансу реактора 5 знаходимо нові значення ентальпії та температури $T_a^{(2)}$ і т. д. Останнім кроком є розрахунок реактора 6, що дає можливість знайти температуру T_n .

Тепер необхідно перевірити, чи задовольняють знайдені температури очевидні умови:

$$\begin{aligned} T_l - T_h > \Delta T_1; \quad T_c - T_l > \Delta T_2; \quad T_g - T_i > \Delta T_3; \\ T_n - T_m > \Delta T_4; \quad T_a - T_m > \Delta T_5, \end{aligned} \quad (9)$$

і, якщо ні, змінити вихідні дані. Зрозуміло, що чим вище температури T_h і T_i , тим краще іде процес конверсії, і більше буде економія палива. Але підвищення цих температур призведе до порушення нерівностей (9). Тому вибирались такі температури, щоб усі нерівності (9) виконувались для $\Delta T_p > 20 - 25$ град. Деякі результати проведених розрахунків як приклад наводяться у таблиці (тут $\alpha = 1,2$; $\nu = 0,247$ для варіанта 1 та 0,27 для варіанта 2).

Економія первинного палива обчислювалась за очевидною формулою

$$\psi = (1 - Q_1/J_k) \cdot 100\%, \quad (10)$$

де Q_1 — калорійність метану. Для порівняння було також виконано термодинамічний розра-

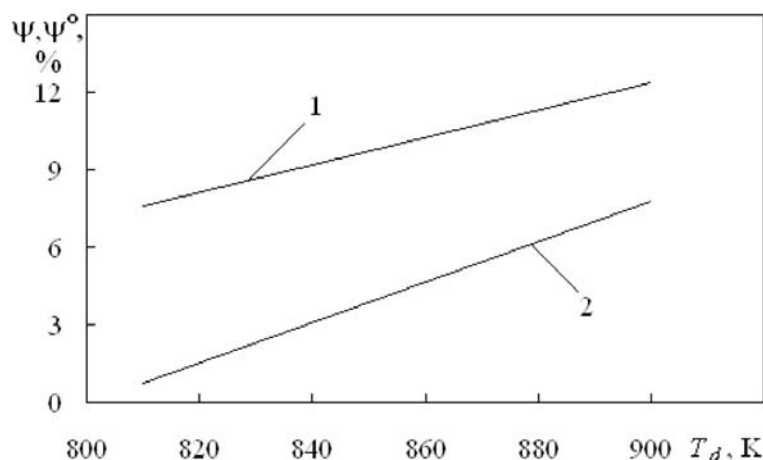


Рис. 2. Залежність економії палива від температури ПЗ: 1 — схема на рис. 1; 2 — проста схема

Таблиця – Параметри робочого тіла

Позначення точки на рис. 1	Параметр	Номер варіанта		
		1	2	
<i>d</i>	Ентальпія, МДж/кмоль СН ₄	254,4	301,7	
	Температура, К	810	900	
<i>l</i>	Ентальпія, МДж/кмоль СН ₄	262,4	308,2	
	Температура, К	825,3	912,1	
<i>g</i>	Ентальпія, МДж/кмоль СН ₄	98,8	111,5	
	Температура, К	1130	1229	
<i>a</i>	Ентальпія, МДж/кмоль СН ₄	10,95	11,51	
	Температура, К	397,8	402,9	
<i>m</i>	Температура, К	373,1	376,9	
<i>h</i>	Склад конвертованого палива, кмоль/кмоль СН ₄	СН ₄	0,538	0,334
		N ₂	1,888	1,829
		H ₂	0,678	1,115
		СО ₂	0,284	0,17
		СО	0,182	0,469
		H ₂ O	0,254	0,164
	Ентальпія, МДж/кмоль СН ₄	65,9	78,6	
	Калорійність, МДж/кмоль СН ₄	647,0	670,3	
	Повна ентальпія, МДж/кмоль СН ₄	712,9	748,9	
	Температура, К	800	885	
<i>i</i>	Склад конвертованого палива, кмоль/кмоль СН ₄	СН ₄	0,013	0,008
		N ₂	0,619	0,677
		H ₂	0,625	0,698
		СО ₂	0,004	0,002
		СО	0,313	0,349
		H ₂ O	0,009	0,006
	Ентальпія, МДж/кмоль СН ₄	39,0	45,6	
	Калорійність, МДж/кмоль СН ₄	249,7	274,2	
	Повна ентальпія, МДж/кмоль СН ₄	288,7	319,8	
	Температура, К	1100	1150	
<i>c</i>	Температура, К	877,7	958,5	
<i>j</i>	Температура, К	835	925	
<i>k</i>	Ентальпія, МДж/кмоль СН ₄	8,26	8,69	
	Калорійність, МДж/кмоль СН ₄	859,1	904,8	
	Повна ентальпія, МДж/кмоль СН ₄	867,3	913,5	
	Температура, К	350	350	
Економія вихідного палива, %		7,49	12,16	

хунок «простої» схеми, де ПЗ після двигуна з певним вмістом кисню надходять як теплоносії у термохімічний реактор, а потім відповідна їх частина надходить безпосередньо на конверсію.

Зрозуміло, що у цьому випадку калорійність КП і економія палива ψ° будуть нижче, ніж за схемою на рис. 1. Значення ψ і ψ° для різних температур ПЗ після двигуна показано на рис. 2.

Як видно, запропонована схема дає набагато кращі результати, ніж схема з реагентом, що містить кисень, причому різниця між схемами збільшується зі зменшенням температури T_d , де негативний вплив кисню більш помітний.

ВИСНОВКИ

Запропоновано нову схему використання теплоти відпрацьованих газів двигуна внутрішнього згоряння на основі методу термохімічної регенерації. Схема дозволяє забезпечити утворення безкисневого реагенту для конверсії палива, що значно підвищує її ефективність. Розроблено метод термодинамічного розрахунку установки. Показано, що запропонована схема дозволяє зекономити до 12,2% вихідного палива.

1. Шрайбер О. А. Використання теплових вторинних енергоресурсів методом термохімічної регенерації. Розрахунок конверсії палива / О.А. Шрайбер // Проблеми загаль-

ної енергетики. – 2013. – №2(33). – С. 39 – 42.

2. Шрайбер О. А. Використання теплових вторинних енергоресурсів методом термохімічної регенерації. Метод розрахунку газотурбінної установки / О.А. Шрайбер // Проблеми загальної енергетики. – 2013. – Вип. 3 (34). – С. 47–51.

Надійшла до редколегії: 23.10.2013

Рецензент

*Зав. відділу оптимізації розвитку паливних баз ІЗЕ НАН України,
канд. техн. наук*

О.В. Стогній