

ВПЛИВ РЕЖИМНИХ ПАРАМЕТРІВ ТА НЕРІВНОВАЖНОСТІ КОНВЕРСІЇ НА ПОКАЗНИКИ ТЕРМОХІМІЧНОЇ РЕГЕНЕРАЦІЇ ТЕПЛОТИ ВІДПРАЦЬОВАНИХ ГАЗІВ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИХ УСТАНОВОК

Досліджено вплив режимних параметрів і нерівноважності конверсії на термодинамічні показники процесу термохімічної регенерації для промислової печі та двигуна внутрішнього згоряння. У схемі регенерації для печі з паралельним розташуванням реактора конверсії і теплообмінника для нагрівання повітря збільшення нерівноважності можна нівелювати зменшенням частки потоку, який спрямовується у реактор. Для двигуна внутрішнього згоряння збільшення частки потоку відпрацьованих газів, що подаються у високотемпературний реактор, призводить до підвищення показників процесу.

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

У різних галузях економіки широко використовуються високотемпературні теплові установки, які працюють на природному газі. Тут слід перш за все назвати різноманітні промислові печі у металургії та машинобудуванні [1], при виробництві скла [2], будівельних матеріалів та ін., а також двигуни внутрішнього згоряння (ДВЗ) [3, 4]. Для усіх цих установок характерна досить висока температура відпрацьованих газів, що призводить до значних втрат теплоти. Повітряна регенерація не дозволяє істотно зменшити такі втрати, і єдина можливість це зробити пов'язана з технологією термохімічної регенерації (ТХР), що базується на ендотермічній реакції вихідного палива із відповідним окислювачем (найбільш просто і зручно з продуктами згоряння), в результаті якої утворюється конвертоване паливо з вищими енергетичними характеристиками. Можливі схеми використання ТХР і методи її термодинамічного розрахунку для ДВЗ і печі наведено в [5, 6]. Ці результати отримані за умови, що реакції конверсії ідуть до досягнення рівноважного стану.

© В.П. ЯЦЕНКО, В.Б. РЕДЬКІН, 2015

Але у реальних процесах ТХР рівноважний стан не досягається, і калорійності конвертованих палив будуть нижче, ніж теоретично можливі. Метою даної статті є визначення впливу нерівноважності та режимних параметрів процесу конверсії на термодинамічні показники запропонованих у [5, 6] схем регенерації.

Промислова піч. Встановлено [6], що найбільші значення коефіцієнта використання палива (КВП) досягаються при паралельному розташуванні термохімічного реактора і теплообмінника для нагрівання повітря (рис. 1). Продукти згоряння (ПЗ) із печі 1 у розподільнику 5 поділяються на два потоки: один спрямовується в реактор 2, а другий – у теплообмінник 3. Після виходу з реактора необхідна кількість ПЗ розподільником 4 направляється у змішувач 6, а залишок скидається в атмосферу. В реакторі ентальпія димових газів використовується для конверсії паливної суміші, яка надходить зі змішувача 6. Літерами у кружечках на рис. 1 і 2 позначені характерні точки схеми.

Коефіцієнт використання палива для такої схеми розраховується за виразом $\eta = 1 - (I_h (1 - 0,25/y) + I_d)/(J_a + I_b)$, де y – частка потоку ПЗ,

що направляється в реактор. Тут I, J – фізична і повна ентальпії. Зрозуміло, що найбільші значення КВП будуть досягатися при мінімальних температурах T_d і T_h (див. рис. 1). Але, з іншого боку, різниці температур між теплоносіями на «холодному» кінці обох апаратів не повинні

бути надто малими, бо це може призвести до необхідності мати дуже розвинені поверхні теплообміну. Тому при визначенні впливу неповноти конверсії на величину КВП потрібно контролювати забезпечення умови $\Delta T_1 = T_d - T_b \approx 25 - 35$ К.

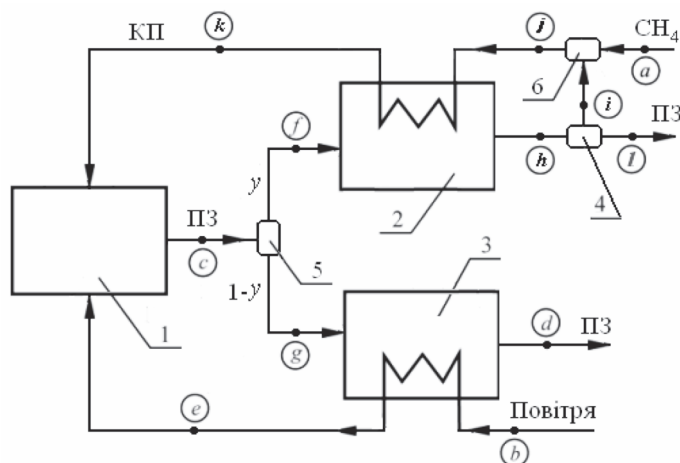


Рис. 1. Схема печі з термохімічною регенерацією теплоти димових газів при паралельному розташуванні реактора і теплообмінника: 1 – піч; 2 – реактор; 3 – теплообмінник; 4, 5 – розподільники; 6 – змішувач

При проведенні розрахунків впливу нерівноважності на термодинамічні показники процесу регенерації значення J_k прийматимемо рівним $J_k = I_k + (1 - \gamma/100) Q_k$, де γ – величина нерівноважності (%), Q_k – калорійність конвертованого палива при $\gamma = 0$. Значення γ варіюватимемо в межах $\gamma = 0 - 10\%$. Як видно зі схеми на рис. 1, в даному процесі ТХР існує додатковий важіль y (частка потоку ПЗ), вибором величини якого можна впливати на показники регенерації. У зв'язку з цим розрахунки показників можна проводити за двома варіантами. Позначимо їх А і Б.

У першому варіанті при $\gamma = 0$ за допомогою спеціально розробленої програми спочатку відшукується величина y^* , яка забезпечує максимальне значення КВП. Знайдена величина фіксується, і подальші розрахунки проводяться для нерівноважних умов, тобто при $\gamma > 0$. У варіанті Б частка y не фіксується, а відшукується для кожного з вибраних значень γ таке її значення, яке забезпечує максимальний КВП.

Для досягнення істотної ефективності регенерації процес конверсії потрібно проводити при високих температурах T_k . Для цього в реак-

торі 2 потрібно відбирати велику кількість теплоти ПЗ, що може призвести до нефізичних (від'ємних) значень температури T_h . Тому при розрахунках термодинамічних показників ТХР величину T_k будемо вибирати з діапазону $T_k = 900 - 1000$ К, а температуру продуктів згоряння варіюватимемо в межах $T_c = 1000 - 1300$ К (це характерно для багатьох високотемпературних печей). Деякі результати, отримані згідно з умовами варіанта А, для прикладу наведені в табл. 1.

Аналіз цих результатів свідчить про те, що при фіксованих значеннях частки продуктів згоряння, які направляються в реактор, величина КВП суттєво зменшується зі збільшенням ступеня нерівноважності. Наприклад, при $T_c = 1100$ К, $T_k = 900$ К, $y^* = 0,637$ коефіцієнт використання палива зменшується більше, ніж на 11 % при збільшенні γ від 0 до 10 %. Подібні результати мають місце і для інших значень T_c , T_k і y^* (див. табл. 1). Цікаво, що величини КВП, отримані при $\gamma = 10$ %, менше аналогічних показників для процесу повітряної регенерації, які при температурах ПЗ 1000 – 1300 К та різниці $\Delta T = T_c - T_e = 30$ К набувають

Таблиця 1 – Термодинамічні показники ТХР в залежності від γ при фіксованих значеннях y^*

$\gamma, \%$	КВП, %	Позначення точки на рис. 1					y^*
		c	e	h	j	k	
		T, K					
0	98,7	1100	766	330	326	900	0,637
5	92,9			597	519		
10	87,1			849	696		
0	98,7	1200	937	330	327	950	0,557
5	92,9			662	566		
10	87,2			974	784		
0	98,7	1100	611	330	326	950	0,761
5	92,7			539	478		
10	86,8			740	6203		
0	98,7	1200	788	330	326	1000	0,666
5	92,7			586	511		
10	86,8			829	683		
0	98,7	1200	667	330	326	1000	0,752
5	92,6			548	485		
10	86,5			758	633		
0	98,7	1300	845	330	326	1000	0,668
5	92,5			593	516		
10	86,4			841	691		

значення 90 – 93 %. Тут T_c і T_e – температури ПЗ і повітря, що подається в піч при повітряній регенерації. Таким чином, проведення процесу ТХР за схемою на рис. 1 при фіксованих значеннях частки потоку, що направляється в реактор, не дозволяє забезпечити високі значення КВП за наявності нерівноважності конверсії.

Розглянемо тепер результати розрахунків згідно з умовами варіанта Б (табл. 2).

Видно, що КВП дуже високий і не залежить від ступеня нерівноважності конверсії. Характерно також, що при цих частках y забезпечуються одні і ті самі (прийнятні для практики) значення температур T_h і T_j . Слід відзначити, що при деяких вихідних даних (T_c , T_k , γ) пошук величини y , яка забезпечує максимальні КВП, призводить до нереальних температур повітря, що подається в піч. Наприклад, при $T_c = 1200$ К, $T_k = 900$ К, $\gamma = 10$ %, $y = 0,337$ маємо $T_e = 1228$ К (див. табл. 2). Ця ситуація пояснюється тим, що треба відібрати від ПЗ значну кількість теплоти в апараті 3, що і призводить до таких високих T_e . Зрозуміло, що про-

цес регенерації з такими вихідними даними неможливий.

Таким чином, за наявності у розглянутій схемі ТХР регулятора частки потоку продуктів згоряння, які направляються в реактор, можна нівелювати вплив нерівноважності конверсії на ефективність термохімічної регенерації.

Двигун внутрішнього згоряння. Можливий варіант схеми утилізації теплоти відпрацьованих газів ДВЗ зображено на рис. 2 [6]. Продукти згоряння після двигуна 1 надходять з температурою T_d у теплообмінник 3, де нагріваються за рахунок фізичної теплоти конвертованого палива (КП) до температури T_f . 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 утворилася би газова суміш із досить високою температурою, що не

Таблиця 2 – Термодинамічні показники ТХР в залежності від γ при оптимальних значеннях γ

γ , %	КВП, %	Позначення точки на рис. 1				γ		
		c	e	h	j			
		T , К						
0	98,72	1100	766	330	326	900	0,637	
5	98,71		918				0,511	
10	98,72		1066				0,385	
0	98,7	1200	937				950	0,557
5	98,72		1085					0,447
10	98,72		1228					0,337
0	98,71	1100	611			1000		0,761
5	98,72		773					0,631
10	98,71		930					0,501
0	98,71	1200	788				1000	0,666
5	98,72		944					0,552
10	98,71		1096					0,438
0	98,71	1200	667	1000	0,752			
5	98,72		831		0,635			
10	98,7		990		0,518			
0	98,7	1300	845		1000	0,668		
5	98,71		1004			0,564		
10	98,71		1158			0,460		

містить кисню (на рис. 2 позначена як ПЗ'). Ця речовина через високотемпературний реактор 5 надходить на змішування з природним газом, і утворена реагуюча суміш розділяється на потоки E і F, що подаються у реактори 5 і 6 відповідно.

Важливими показниками процесу регенерації для запропонованої схеми є економія первинного палива ψ та ефективність E викори-

стання теплоти згоряння палива, які можуть бути обчислені за формулами $\psi = (1 - Q/J_k) \cdot 100 \%$, де Q, J_k – калорійності метану і конвертованого палива, та $E = 1 - I_n/(I_o + Q)$, де I_o, I_n – ентальпії повітря і ПЗ, які викидаються в атмосферу.

Вплив розподілу реагуючої суміші між реакторами конверсії. За умовами роботоздатності схеми реактори 5 і 6 мають різні температури конверсії (перший – вищі, а другий – нижчі).

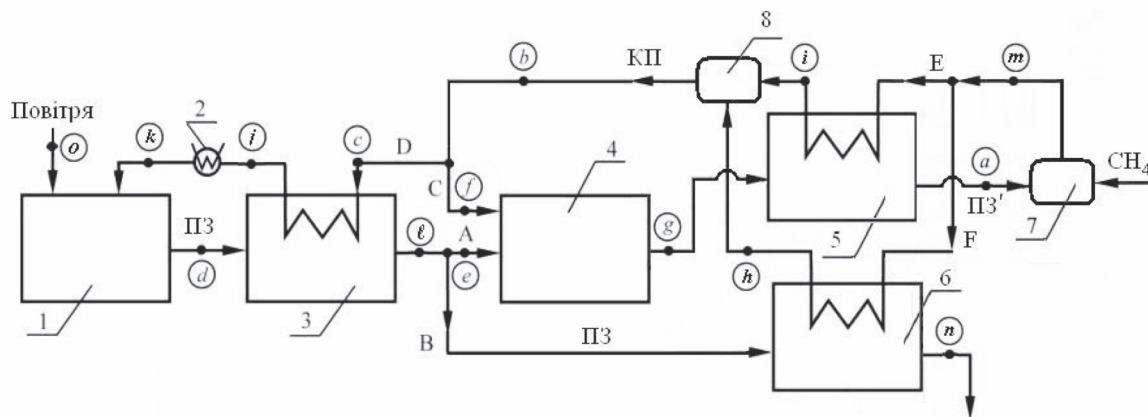


Рис. 2. Схема установки для використання теплоти відпрацьованих газів ДВЗ: 1 – ДВЗ; 2 – холодильник; 3 – теплообмінник; 4 – камера згоряння; 5 – «високотемпературний» реактор; 6 – «низькотемпературний» реактор; 7, 8 – змішувачі; ПЗ – продукти згоряння без кисню

Таблиця 3 – Залежність ψ і E від β

β	0,2	0,22	0,24	0,26	0,28	0,3
ψ , %	11,52	11,71	11,89	12,07	12,25	12,43
E , %	88,4	88,6	88,9	89,1	89,4	89,6

Зрозуміло, що величини потоків паливної суміші, які надходять у ці реактори, також будуть різними. Для виявлення впливу цих потоків на показники регенерації виконано числові дослідження при таких значеннях параметрів: температура продуктів згоряння на виході з двигуна $T_d = 800 - 900$ К; температури конверсії $T_h = 700 - 900$ К; $T_i = 1000 - 1200$ К; температура конвертованого палива, яке подається в двигун, $T_k = 350 - 450$ К; коефіцієнт надлишку повітря $\alpha = 1,1 - 1,3$. Температури метану і повітря були однаковими і дорівнювали 300 К.

Аналіз отриманих результатів показав, що збільшення частки β потоку реагуючої суміші, яка спрямовується у високотемпературний реактор 5, і відповідне зменшення потоку у реактор 6 призводять до деякого збільшення як економії первинного палива, так і ефективності його використання. Для прикладу в табл. 3 наведено результати розрахунків при $\alpha = 1,2$, $T_d = 900$ К, $T_h = 885$ К, $T_i = 1150$ К, $T_k = 350$ К. Видно, що при застосуванні даної схеми вигідними будуть більші значення β . Але, як показали розрахунки, існують граничні значення β , перевищення яких призводить до нереальних температур продуктів згоряння ПЗ на виході з високотемпературного реактора. У наведеному в табл. 3 прикладі при $\beta = 0,3$ маємо $T_a = 264$ К, що нефізично.

Граничні значення β залежать від режимних параметрів процесу регенерації. Але аналіз результатів проведених числових досліджень

свідчить, що в наведеному вище діапазоні зміни параметрів величина β не повинна перевищувати 0,28 – 0,29.

Вплив нерівноважності процесу конверсії. Оскільки в реакторах 5 і 6 мають місце різні умови конверсії, то логічно припустити, що і значення γ в цих реакторах можуть бути різними. Для подальшого позначимо їх γ_1 , γ_2 для високо- і низькотемпературних реакторів. Величина знижень γ_1 , γ_2 варіювалася у межах 0 – 10 %. Значення показників ТХР для двох варіантів розрахунків наведено у табл. 4.

З цих даних видно, що нерівноважність конверсії практично не впливає на ефективність використання палива. В той самий час нерівноважність призводить до зменшення економії первинного палива, причому зниження ступеня конверсії у низькотемпературному реакторі впливає на величину ψ суттєвіше, ніж у високотемпературному.

Наприклад, у варіанті 1 з табл. 4 у разі рівноважності конверсії маємо $\psi = 12,25$ %, а при $\gamma_1 = 5$ %, $\gamma_2 = 0$ – $\psi = 10,93$ %. Отже, при застосуванні запропонованої установки для використання теплоти відпрацьованих газів ДВЗ слід забезпечувати умови, за яких нерівноважність процесу конверсії у низькотемпературному реакторі буде мінімальною.

ВИСНОВКИ

При проведенні процесу термохімічної регенерації для промислової печі з розподілом

Таблиця 4 – Залежності ψ і E від ступеня конверсії при $\alpha = 1,2$, $\beta = 0,28$, $T_d = 900$ К, $T_k = 350$ К

№ варіанта	1				2			
T_i , К	1150				1200			
T_h , К	885				900			
γ_1 , %	0	5	0	5	0	5	0	5
γ_2 , %	0	0	5	5	0	0	5	5
ψ , %	12,25	10,93	9,1	7,68	13,07	11,76	9,94	8,54
E , %	89,4	89,5	89,6	89,6	90,5	90,6	90,7	90,8

потоків відпрацьованих газів між реактором конверсії і теплообмінником негативний вплив нерівноважності конверсії можна нівелювати зменшенням частки потоку, який спрямовується у реактор. У розглянутій схемі двигуна внутрішнього згоряння збільшення частки потоку реагуючої суміші, яка спрямовується у високотемпературний реактор, і відповідне зменшення потоку у низькотемпературний приводять до збільшення як економії первинного палива, так і ефективності його використання. Для зменшення впливу нерівноважності конверсії на показники регенерації у ДВЗ слід забезпечувати умови, за яких нерівноважність процесу конверсії паливної суміші у низькотемпературному реакторі буде мінімальною.

1. Губинский В.И. Теория пламенных печей / В. И. Губинский, Чжун-У Лу. – М.: Машиностроение, 1995. – 256 с.
2. Гойхман В.Ю. Печная теплотехника в производстве стекла / В. Ю. Гойхман, В. Н. Руслов, В. А. Костыря. – Х.: Факт, 1997. – 288 с.
3. Мысник М.И. Анализ теплофизических свойств альтернативных топлив для двигате-

лей внутреннего сгорания / М.И. Мысник, А.Е. Свистула // Ползуновский вестник. – 2009. – №1-2. – С. 37 – 43.

4. Левтеров А. М. Сравнительная экспериментальная оценка энергоэкологических показателей конвертированного газового двигателя на базе дизеля / А. М. Левтеров, В. Н. Бганцев, П. Ю. Нечволод // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2015. – № 6 (137). – С. 20 – 27.

5. Шрайбер О. А. Використання теплових вторинних енергоресурсів методом термохімічної регенерації у двигуні внутрішнього згоряння / О. А. Шрайбер, В. П. Яценко // Проблеми загальної енергетики. – 2013. – № 4 (35). – С. 47 – 51.

6. Яценко В. П. Використання теплоти відпрацьованих газів промислових печей методом термохімічної регенерації / В. П. Яценко, О. А. Шрайбер // Проблеми загальної енергетики. – 2014. – № 1 (36). – С. 19 – 23.

Надійшла до редколегії 25.12.2015