

Л.С. ГАПОНИЧ, канд. техн. наук

З.П. МЕЛЬНИК, канд. техн. наук

Н.В. ІВАЩЕНКО

Національний університет харчових технологій

М.В. ЧЕРНЯВСЬКИЙ, канд. техн. наук

Інститут вугільних енерготехнологій НАН України

ТЕХНОЛОГІЇ ПЕРЕРОБКИ НИЗЬКОЯКІСНОГО ВУГІЛЛЯ ДЛЯ ЕНЕРГОУСТАНОВОК МАЛОЇ ТА СЕРЕДНЬОЇ ПОТУЖНОСТІ

Наведено результати дослідження впливу режимних параметрів на піроліз вугілля в технологіях двоступеневої термічної переробки в киплячому шарі. Експериментально визначені оптимальні режими роботи піролізера. Встановлено, що додавання вапнякового сорбенту здатне забезпечити зв'язування сірки вугілля в піролізері вище 90 % за умов термічного розкладання вапняку на ступені спалювання при оптимальних температурах.

Ключові слова: піроліз вугілля, режимні параметри, зв'язування сірки вугілля, енергоустановки.

В статье представлены результаты исследования влияния режимных параметров на пиролиз угля в технологиях двухступенчатой термической переработки в кипящем слое. Экспериментально определены оптимальные режимы работы пиролизера. Установлено, что добавка известкового сорбента способна обеспечить связывание серы угля в пиролизере выше 90 % при термическом разложении известняка на ступени сжигания при оптимальных температурах.

Ключевые слова: пиролиз угля, режимные параметры, связывание серы угля, энергоустановки.

Енергетична безпека країни визначається наявністю власних ресурсів, рівнем їх ефективного використання на основі впровадження передових технологій, до яких треба віднести методи двоступеневої термічної переробки вугілля з попереднім піролізом на першому ступені та спалюванням коксозольного залишку у різних модифікаціях киплячого шару (КШ), у тому числі під тиском, на другому ступені [3, 6]. Ці технології порівняно з іншими технологіями КШ мають низку додаткових переваг: більш високий к.к.д. енергоблоків (до 42—47 %) за рахунок використання комбінованого парогазового циклу; менші габарити і метало-, матеріаломісткість; більш висока ефективність спалювання палива; можливість регулювання продуктивності установок у широких межах. Двоступенева організація процесу термічної переробки вугілля дозволяє підвищити калорійність газів на вході в камеру спалювання газової турбіни, а також підвищити надійність роботи за рахунок захисту нижньої частини шару та циклону від перегріву, пов'язаного з горінням летких. Поряд з цим вищезгадані технології дозволяють комплексно вирішувати питання охорони навколишнього середовища. Шкідливі викиди на котлі КШ задовольняють міжнародним екологічним нормативам і не перевищують: для SO_2 — 400 мг/м³; для NO_x — 400 мг/м³; для CO — 250 мг/м³; для пилу — 50 мг/м³. Ці технології мають значний інтерес і для харчової промисловості, в зв'язку з переходом ТЕЦ цукрових та олійних заводів з газу на вугілля.

Вміст викидів NO_x в димових газах менше 400 мг/м³ при спалюванні в різних модифікаціях КШ забезпечується температурами процесу не більше 850—950 °C та оптимальним розподілом первинного і вторинного дуття. Вміст викидів SO_2 менше 400 мг/м³ забезпечує використання методу зв'язування SO_x вапняком [2], що додається в топку КШ з молярним співвідношенням до сірки, що входить із вугіллям, на рівні $\text{Ca/S} = 1,8 - 2,5$. При цьому спостерігається 95 % зв'язування SO_x без додаткової сіркоочистки.

Щодо технологій з попереднім піролізом, питання зв'язування SO_x відкрите з наступних причин. Перша з них полягає в тому, що оптимальні температури зв'язування SO_x вапняком відповідають оптимальним температурам перебігу першої стадії процесу $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{O}_2$, а саме 840—890 °C. При спалюванні в різних модифікаціях КШ цей рівень температур забезпечується організацією процесу, чого не можна сказати про попередній піроліз, де температурний рівень визначається співвідношенням витрат теплоносія — золи, й вихідного палива, тобто кратністю циркуляції, і завжди буде нижче, ніж характерні температури КШ. Друга причина полягає в можливому впливі важких смольних залишків на реагуючу поверхню термообробленого вапняку, що здатне знизити швидкість процесу зв'язування SO_x .

Аналіз досвіду експлуатації дослідних та промислових установок термічної переробки вугілля та сла-

нців з попереднім піролізом показує, що для створення технології двоступеневої термічної переробки вугілля необхідно враховувати вплив умов евакуації на закономірності газовиділення при піролізі.

В експериментах розв'язувалися задачі: моделювання різних умов евакуації продуктів піролізу та оцінка їх впливу на ступінь відгонки летких; оптимізація режимів роботи піролізера, а саме досягнення максимального ступеня відгонки летких при мінімальному баластуванні піролізного газу евакуюючим агентом; дослідження можливості досягнення високих екологічних показників на установці двоступеневої термічної переробки. Дослідження проводилося на установці УТТ-2-2.76 продуктивністю по вугіллю до 1 т за годину, принципова схема якої наведена на рис.

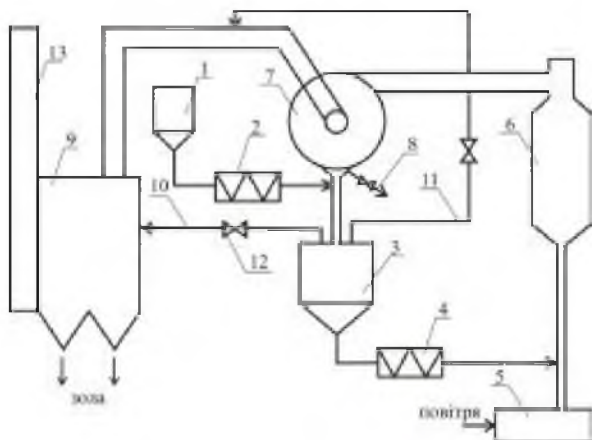


Рис. Принципова схема установки УТТ-2-2.76: 1 — бункер вугілля, 2 — шнек вуглеподавання, 3 — піролізер, 4 — шнек циркуляції, 5 — камера розпалення і зливу золи АФП, 6 — АФП, 7 — горизонтальний циклон, 8 — злив золи циклону, 9 — котел-утилізатор, 10 — основний тракт скидання пірогазу, 11 — альтернативний тракт скидання пірогазу, 12 — регулюючий шибер, 13 — димова труба.

Це установка двоступеневої термічної переробки твердого палива з попереднім піролізом, за рахунок тепла циркулюючої золи, на першому ступені й допалюванням коксозольного залишку в аерофонтанному передтопку (АФП). Аерофонтанна топка є варіантом топки КШ, спрощеним за рахунок відсутності ковпачкової решітки.

Установка працює наступним чином. Подрібнене вугілля з розміром частинок від 0—7 до 0—25 мм із бункера 1 подається шнеком 2 у підциклонний стояк і змішується з потоком циркулюючої золи. Суміш попадає в піролізер бункерного типу 3, де піроліз здійснюється за рахунок тепла циркулюючої золи. Коксозольна суміш після шнека 4 підхоплюється потоком повітря з камери розпалення 5 і надходить в АФП 6, де відбувається автотермічне горіння коксозольної суміші. Твердий залишок виноситься з АФП потоком димових газів у циклон 7, де розділяється на дві частини: більша — це циркулюючий матеріал (середні й грубі частинки), менший — винесення. Винесення надходить у котел-утилізатор 9, де допалюється в стабілізуючому факелі парогазових продуктів піролізу, які надходять у котел-утилізатор по трубопроводу 10 за рахунок розрідження в

котлі. Для розв'язки по газу між циклоном і піролізером у трубопроводі 10 передбачено регулюючий шибер 12. На установці існує альтернативний трубопровід із запірною-регулюючим шибером 11 для скидання парогазових продуктів піролізу за циклон у зону ежекції потоку димовими газами. Зола з установки виводиться: грубі частинки через злив камери 5, середні й грубі частинки через злив циклона 8, дрібні частинки через злив поду котла-утилізатора 9.

Установка УТТ—2—2.76 оснащена напівпромисловою системою контролю й керування, яка включає вимірювання:

витрати дуттьового повітря (тарировка по шайбовому витратоміру);

витрат вугілля й циркулюючого коксозольного матеріалу (тарировка по швидкостях обертання шнеків подачі вугілля 2 і циркуляції 4);

перепадів тиску на АФП, від виходу АФП до котла-утилізатора, між циклоном і піролізером, між піролізером і котлом-утилізатором;

температур в АФП, у циклоні, у змішувачі піролізера, у нижній частині піролізера перед шнеком циркуляції, у газоході після циклону;

рівня матеріалу у піролізері (за показниками трьох g-рівнемірів);

концентрацій кисню на виході АФП (киснеміром безперервної дії);

та керування витратою дуттьового повітря (регулюючим шибером), витратою вугілля (швидкістю обертання шнека 2), потоком циркулюючого коксозольного матеріалу (швидкістю обертання шнека 4), зливом циркулюючої золи (хлипаючим шибером 8), витратою повітря в котлі-утилізаторі (на пальник факела парогазової суміші).

Крім того, при проведенні експериментів періодично проводяться:

технічний і гранулометричний аналіз проб твердої фази: вугілля на вході в шнек 2, коксозольної суміші зі шнека 4, зольного залишку зі зливу 8;

хроматографічний аналіз проб газової фази: димових газів на виході АФП і на вході в котел-утилізатор, парогазової суміші із трубопроводу 10.

Технологічні випробування проводяться в такий спосіб. Піролізер завантажується інертним матеріалом — зольним залишком від попередніх експериментів. Включається прогрів установки мазутною крапельницею в пусковій камері, після подачі дуттьового повітря — додатковою мазутною крапельницею в розгінній ділянці АФП. Контур циркуляції (АФП, циклон, піролізер) прогривається після включення шнека циркуляції. По досягненні температури АФП 750—800°C, піролізера 450—550°C, включається шнек подачі вугілля. Після прогріву АФП до температури 850—950°C мазутні крапельниці відключаються, і установка переходить в автотермічний режим. Паралельно запалюється факел парогазових продуктів піролізу в котлі-утилізаторі. При заданій витраті дуттьового повітря перепад тиску на АФП, що характеризує ступінь заповнення АФП коксозольним

матеріалом, регулюється витратою циркулюючого матеріалу (швидкістю обертання шнека 4). Постійний рівень матеріалу в піролізері регулюється частотою зливу циркулюючого матеріалу через хлипавку 8. Температура в піролізері регулюється кратністю циркуляції — відношенням витрат циркулюючого матеріалу й вугілля, яка для даної установки становить від 2 до 8.

Об'єктом дослідження було високозольне львівсько-волинське газове вугілля: $W^r = 4 - 6 \%$, $A^r = 54 - 63 \%$, $V^r = 10 - 13 \%$, $S_t^r = 3,4 - 3,5 \%$, розмір частинок $0 - 7$ мм. Факельне спалювання цього вугілля ускладнено через високий вміст золи, який призводить до зниження температури в ядрі факела й у зоні запалення і до неможливості стабільного горіння факела без газомазутного підсвічування. Аерофонтанна топка виконує роль передтопки (АФП), а основна частина вуглецю, що не догорів, у виді пилоподібного винесення з циклона скидається в пиловугільну топку і допалюється в факелі парогазових продуктів піролізу.

Технологічні експерименти планувалися на підставі встановлених у лабораторних дослідженнях закономірностей газовиділення при піролізі вугілля в діапазоні режимних параметрів, характерних для технологій киплячого шару [1]: того, що в умовах, коли піроліз вугілля відбувається в середовищі власних продуктів, газовиділення характеризується парціальними тисками насичення P_{oi} , перевищити які в експериментах не вдається, принаймні для H_2 , CH_4 , CO ; встановлених для цих газів температурних залежностей максимальних тисків насичення. Зазначені закономірності дозволяють оцінити очікуваний вміст у піролізному у газі H_2 , CH_4 , CO .

При кратності циркуляції 6—8 і оптимальних для спалювання львівсько-волинського газового вугілля температурах циркулюючих зольних частинок на виході АФП й у циклоні $830 - 930^\circ C$, у змішувачі піролізера встановлюється середня температура $730^\circ C$ [4]. При цьому в піролізний газ переходить 30—80 % по масі від стандартно визначеного виходу летких. Для цієї температури встановлені наступні значення парціальних тисків насичення [1]: для H_2 — 0,009 МПа, CO — 0,006 МПа, CH_4 — 0,013 МПа. При тиску в піролізері, близькому до атмосферного, очікувані гранично досяжні об'ємні частки для зазначених газів становлять відповідно 9, 6 і 13 %. Крім зазначених газів, парогазова суміш продуктів піролізу включає газоподібні вуглеводні $C_n H_m$ (до 6—10 об. %), пари важких вуглеводнів і смол, N_2 , CO_2 (з димових газів і продуктів піролізу) і H_2O .

За умови відсутності примусового розбавлення газоподібних продуктів газом-носієм, і з урахуванням оціненого розходження в істинному й вимірюваному об'ємному складі піролізного газу, пов'язаного з присутністю H_2O і інших компонентів, що конденсуються, одержимо:

при повному виході летких:

об'ємний склад пірогазу $H_2 + CO + CH_4 = 28 \%$, $H_2O = 31 \%$, інше 41 %;

склад на сухий об'єм пірогазу $H_2 + CO + CH_4 = 41 \%$, інше 59 %;

при половинному виході летких:

об'ємний склад пірогазу $H_2 + CO + CH_4 = 28 \%$, $H_2O = 62 \%$, інше 10 %;

склад на сухий об'єм пірогазу $H_2 + CO + CH_4 = 73 \%$, інше 27 %.

Хоча наведений орієнтовний розрахунок не враховує інших суттєвих факторів, таких як реагування залишкового кисню димових газів із продуктами піролізу й вторинні гомогенні реакції, його результати можна розглядати в якості найкращих очікуваних показників роботи піролізера. Таким чином, вихідними даними для пошуку оптимального режиму роботи піролізера при температурі піролізу $730^\circ C$ можна вважати: конверсію летких у піролізері не менше 80 %; склад пірогазу на сухий об'єм $H_2 + CO + CH_4 = 40 - 70 \%$, інше 30—60 % (у тому числі до 10—15 % $C_n H_m$).

Було реалізовано три різних за умовами евакуації режиму роботи піролізера, параметри яких представлені в таблиці. Експерименти характеризувалися близькістю основних параметрів по установці в цілому, що дозволяло порівнювати їх результати по ознаці різних режимів роботи піролізера [5]. Температура в змішувачі піролізера підтримувалася на рівні, визначеному із оціночного розрахунку очікуваних показників роботи піролізера.

Таблиця

**Параметри й результати розрахунків
у експериментах на установці УТТ-2-2,76
для різних режимів роботи піролізера**

Показник	Режим 1	Режим 2	Режим 3
Витрати:			
повітря G_n , $m^3/год.$	455	460	460
вугілля G_n , $кг/год.$	172	152	142
Температури, $^\circ C$:			
АФП	890	810	920
циклон	830	920	830
змішувач піролізера	850	720	830
піролізер	650	630	620
O_2 у димових газах, % об.	5,5	12,2	7,6
Склад пірогазу, % об.:			
CO_2	10,5	18,7	14,1
$N_2 + Ar$	73,6	12,3	28,2
$H_2 + CO + CH_4$	13,2	53,3	47,4
$C_n H_m$	2,2	15,4	10,3
Ступінь конверсії, %:			
летких у піролізері	68,5	7,4	84,1
вуглецю в АФП	89	41	85
Ступінь зв'язування сірки ($Ca/S = 1,8 - 2,0$, $G_{зап} = 32$ $кг/год.$), %:			
у піролізері	96	92	95
в цілому	94	90	92

У режимі примусової евакуації продуктів піролізу досягалася висока (до 70 %) ступінь відгону летких у піролізері при розведенні парогазових продуктів

димовими газами (більше 70 %). У режимі погіршеної евакуації продуктів піролізу вихід летких з піролізера відбувався головним чином під дією їх власного надлишкового тиску. У цьому режимі спостерігалася відносно низька (30 %) ступінь відгону летких при високій чистоті (менше 12 % негорючого баласту) піролізного газу. У режимі авторегулюємої евакуації вихід продуктів піролізу з піролізера відбувався за рахунок ежектуючого динамічного розрідження на виході тракту скидання пірогазу на вихід циклона. Авторегуляція евакуації зводилася до того, що при збільшенні витрати вугілля, що приводить до збільшення виходу пірогазу, для підтримки умов повного згоряння в АФП одночасно збільшувалася витрата повітря. Збільшення витрати димових газів через циклон вело до зростання динамічного розрідження на його виході. У цьому режимі вдалося досягти оптимального сполучення високого ступеня відгону летких у піролізері (більше 80 %) і низького розведення піролізного газу. Вміст горючих компонентів у парогазовій суміші становив до 60 % об. сух., у тому числі $H_2 + CO + CH_4 - 47,4$ % об. сух., що близько до найкращих очікуваних показників роботи піролізера при температурі 730°C.

Зіставлення результатів балансових розрахунків по ступеню зв'язування сірки й режимних параметрів в експериментах на установці УТТ-2-2.76 з подачею вапняку разом з вугіллями з мольним співвідношенням $Ca/S = 1,8 - 2,0$ показує наступне. Незважаючи на те, що температури в піролізері не перевищували 650°C, у всіх експериментах ступінь зв'язування сірки в піролізері перевищувала 90 %. Найменший ступінь зв'язування сірки (92 %) спостерігався в режимі 2, який характеризувався умовами погіршеної евакуації продуктів піролізу. У всіх проведених експериментах ступінь зв'язування сірки в піролізері спостерігався вище, ніж в установці в цілому.

Зв'язування сірки вапняком відбувається головним чином у піролізері, за умови розкладання вапняку до CaO в АФП при оптимальних температурах розкладання 840—890°C. Температура піролізу і місце введення в установку вапняку грають значно меншу роль. Разом з тим умови погіршеної евакуації не є сприятливими для зв'язування сірки, оскільки підвищується ризик закриття реагуючої поверхні вапняку важкими смоляними залишками.

Аналіз результатів показує, що при простому аерофонтанному варіанті КШ і бункерному піролізері для високосольного кам'яного вугілля за рахунок оптимізації режимних параметрів можна досягти конверсії 85 % летких у піролізний газ з нижчою теплотворною здатністю палива 17—20 МДж/м³ при загальному ступені конверсії вугілля до 90 %. Така технологічна схема видається придатною для енергоустановок малої і середньої потужності і дає змогу підтримувати задовільні технологічні та екологічні характеристики спалювання навіть дешевого низькоякісного вугілля.

Висновки. В статті доведено визначальний вплив умов евакуації продуктів піролізу вугілля на ефектив-

ність їх відгонки в піролізері установки двоступеневої термічної переробки. За інших рівних умов, погіршення умов евакуації продуктів піролізу призводить до зниження ступеня відгонки летких з 68—84 % до 30 %. Експериментально визначені оптимальні режими роботи піролізера, які забезпечують високий ступінь відгонки летких при низькому ступені розведення піролізного газу евакуюючим агентом. При двоступеневій термічній переробці вугілля сірка з вугілля виділяється й може бути зв'язана в основному в піролізері вапняком ($Ca/S = 1,8 - 2,0$), попередньо розкладеним у топці КШ до CaO й присутнім у циркулюючій золі — теплоносії.

ЛІТЕРАТУРА

1. Гапонич Л.С., Чернявський М. В. Використання термоконтактного піролізу при двоступеневій переробці кам'яного та бурого вугілля // *Енергетика: економіка, технології, екологія* — 2000. — №4, — С.41—46.
2. Hiltunen M. SO_2 , NO_x and halogens emission control in Pyroflow circulating fluidized-bed boilers when using low grade fuels // *Proc. of VTT Symposium 108.* — V.II. — Finland (Helsinki). — 1990. — Р. 203 — 214.
3. Корчевой Ю.П., Майстренко А.Ю., Топал А.И. Экологические чистые угольные энерготехнологии. — Київ: Наукова думка, 2004. — 187 с.
4. Новые способы использования низкосортных топлив в энергетике: Сб. научн. тр. — М.: ЭНИН им. Кржижановского, 1989. — 230 с.
5. Чернявський Н.В., Дулиенко С.Г., Гапонич Л.С. Оптимізація режимов роботи і екологічних показателів термоконтактного піролізера енергоустановок с циркулюючим флоєм // *Екотехнологии и ресурсосбережение.* — 1998. — №3. — С. 17—20.
6. Чернявський Н.В. Повышение эффективности использования твердых топлив в энергетике за счет предварительного термоконтактного пиролиза // *Екотехнологии и ресурсосбережение.* — 1998. — №4. — С. 3—9.

Одержана редколлегиею 30.05.08 р.