

УДК 697.432

Підвищення ефективності спалювання твердого палива в шарі

М. П. Сенчук¹

¹к.т.н., доц., Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна, smp_21@ukr.net.
ORCID: 0000-0001-8968-7336

***Анотація.** Проаналізовано основні напрямки підвищення ефективності роботи твердопаливних теплогенераторів. Відмічено, що в промислових зразках теплогенераційних установок залежно від їхнього класу застосовуються різного рівня за капітальними й експлуатаційними витратами технологічні схеми спалювання твердого палива. Наведено приклади реалізації таких технологічних схем спалювання на підставі результатів теоретичних і експериментальних досліджень у конструкціях твердопаливних теплогенераторів. У роботі запропоновано конструктивну схему теплогенератора невеликої потужності з комбінованою технологією двокамерного спалювання твердого палива, у якій поєднано шаровий (або шахтно-шаровий) процес горіння зі спалюванням в об'ємі: в первинній камері згорання над шаром палива, що горить на колосниковій решітці, та у вторинній циклонній камері (або камерах). Завдяки вихровому руху в футерованій вторинній камері високотемпературних газів з умістом твердих частинок, винесених потоком із зони горіння первинної камери, відбувається як допалювання горючих речовин, так і сепарація зольних частинок з відведенням їх до зольника теплогенератора. Така технологія спалювання дозволяє також підвищити форсування горіння шару на колосниковій решітці, підвищити стабільність процесу, зменшити габарити конструкції. Підвищення ефективності роботи твердопаливного теплогенератора з двокамерною топкою досягається завдяки зменшенню втрат теплоти з механічною неповнотою згорання вуглецевих частинок у відвідних газах, а також зниження концентрації зольних частинок у потоці газів на вході конвективних теплообмінних поверхонь і, відповідно, підвищення їхньої теплової ефективності. Це підтверджено розрахунковими залежностями ефективності роботи механізованого твердопаливного теплогенератора за різних технологічних схем спалювання твердого палива.*

Ключові слова: твердопаливний теплогенератор, технологічна схема спалювання, первинна і вторинна камери згорання, циклонна камера згорання, двокамерна топка, тверде паливо

Вступ. З метою зменшення витрат на виробництво теплової енергії, а також з урахуванням дефіциту якісного палива [1-6] розвиток вітчизняної котлової техніки комунальної енергетики направлено на заміщення дорогих видів палива на дешевші нижчої якості. Водночас, ефективне використання низькосортного палива потребує удосконалених технологій спалювання.

Твердопаливні теплогенератори невеликої потужності до 4 МВт експлуатуються переважно зі спалюванням палива в шарі. Здебільшого це викликано простотою експлуатації за можливості підтримання стійкого процесу горіння в широкому діапазоні навантажень. Обмеження діапазону регулювання потужності задаються вимогами до екологічних показників.

Раціональні напрямки у підвищенні коефіцієнта корисної роботи теплогенераційних установок при використанні дешевого низькосортного палива:

- застосування схем організації процесу спалювання, зокрема механізованого, за видом палива з відповідними характеристиками;
- позонне регулювання первинного і вторинного дуттьового повітря із заданим співвідношенням між витратами;
- глибоке очищення відвідних газів за межа-

ми установки;

- комбінування різних схем організації подачі палива і повітря та різних способів спалювання.

У роботі пропонується комплексна схема організації спалювання твердого палива за поєднання в конструкції твердопаливного теплогенератора спалювання палива в шарі, в об'ємі топкової камери та у вихровому потоці циліндричної камери згорання.

Актуальність дослідження. Підвищення ефективності спалювання твердого палива, зокрема низькосортного, в теплогенераторах невеликої потужності комунальної енергетики за організації комплексної технологічної схеми топкового процесу горіння палива в шарі і об'ємі дозволяє максимально використовувати місцеве паливо.

Останні дослідження та публікації. Розвитку котельної техніки за напрямом використання твердого палива в комунальній теплоенергетиці присвячено багато теоретичних і експериментальних робіт [1-11]. Наукові праці враховують тенденцію останніх десятиліть щодо підвищених вимог до економічних і екологічних показників роботи джерел теплової енергії і направлені як на удосконалення наявних, так і створення нових конструкцій твердопаливних теплогенераторів невеликої по-

тужності.

Можна відмітити такі основні напрямки покращення теплотехнічних і екологічних показників роботи твердопаливних теплогенераторів:

- використання попередньо підготовленого якісного твердого палива: паливні гранули, брикети, розсортоване вугілля;
- комплексна механізація всіх стадій топового процесу;
- регульовані системи зонного розподілення у потрібному співвідношенні первинного і вторинного дуттьового повітря;
- механічне очищення теплообмінних поверхонь з потрібною частотою під час експлуатації установок;
- застосування систем глибокого очищення відхідних газів;
- удосконалення конструктивних і режимних параметрів зони горіння технологічних схем теплогенераторів;
- застосування комбінованих схем спалювання тощо.

Вибір напрямку підвищення ефективності роботи теплогенераторів залежить як від нормативних вимог за відповідним класом, наявного палива, умов експлуатації тощо, так і від капітальних витрат на впровадження та експлуатацію теплогенераторів.

Одним з прикладів дорогих технологій спалювання є використання якісного попередньо підготовленого палива за комплексної механізації всіх стадій процесу горіння. Серед відомих зразків такого класу може бути конструкція водогрійних твердопаливних котлів «Світлобор» потужністю до 750 кВт зі спалюванням в автоматичному режимі пелет і тріски (рис.1,[12]). Така технологія спалювання передбачає механізовані і регульовані системи:

- паливоподачі в бункер котла, а далі через шлюзову протипожежну камеру в ретортний пальник;
- розподілення первинного і вторинного повітря;
- очищення конвективних теплообмінних поверхонь від золошлакових відкладень;
- очищення решітки від шлаку;
- сухе очищення відхідних газів від твердих частинок;
- видалення золи і шлаку.

Конструкції твердопаливних котлів з комплексною автоматизацією всіх механізованих технологічних процесів забезпечує високі показники роботи на якісному паливі – коефіцієнт корисної дії перевищує 92 % на пелетах з вологістю до 5 % і зольністю до 0,5 %.

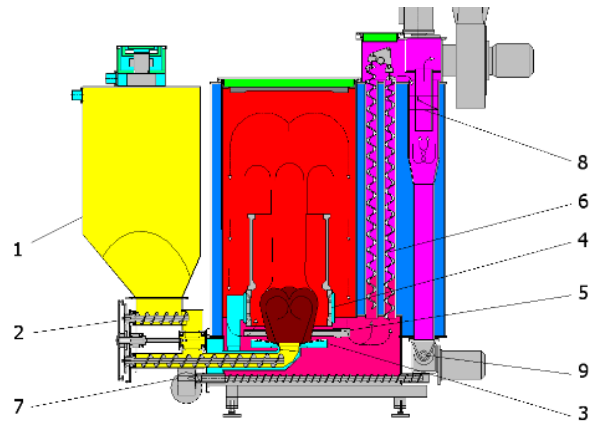


Рис. 1. Схема механізованого твердопаливного водяного котла «Світлобор»:

1 – бункер з пристроєм пневмоподачі пелет з паливного складу; 2 – живильник (шнек дозатора; протипожежний шлюз, шнек подачі в ретортний пальник; привід пристроїв); 3 – ретортний пальник з нагріванням первинного повітря; 4 – футерована камера згорання з розподільним каналом і соплами вторинного повітря; 5 – пристрій для очищення колосникової решітки від шлаку; 6 – пристрій очищення димогарних труб; 7 – пристрій видалення золи з котла; 8 – мультициклон очищення відхідних газів від твердих частинок; 9 – пристрій видалення золи з мультициклона

Через дефіцит у країні якісного палива, наукові дослідження щодо розроблення конструкцій спрямовано на раціональне використання твердого палива в теплогенераторах з менш затратними технологіями. Водночас, спалювання без попереднього підготовлення рядового палива пов'язане зі збільшенням втрат теплоти з механічною неповнотою згорання як зі шлаком та провалом $q_4^{шл+пр}$, так і з винесенням відхідними газами недогорілих частинок $q_4^{внн}$, а відповідно, зниженням коефіцієнта корисної дії теплогенератора.

Крім цього, зольні частинки сприяють утворенню відкладень на теплообмінних поверхнях зі зниженням коефіцієнта теплової ефективності. Вплив різних складових теплового балансу на сумарне зниження ефективності роботи котла неоднаковий. При спалюванні палива у щільному шарі переважають втрати $q_4^{шл+пр}$. Однак, при великому вмісті дрібних фракцій зростають втрати $q_4^{внн}$. Зниження їх у наявних конструкціях топків досягають за зменшення форсування шару, а відповідно, зниження потужності даного теплогенератора.

За переважного факельного способу спалювання сумарні втрати теплоти зростають в основному за рахунок зміни величини $q_4^{внн}$ залежно від частки баласту в паливі (рис. 2, [10]). При зміні нижчої теплоти згорання Q_n' від 21,8 МДж/кг до 17,0 МДж/кг теплові втрати з механічною неповнотою згорання $q_4^{внн}$ зростають приблизно від 4,0 до 10,3 %.

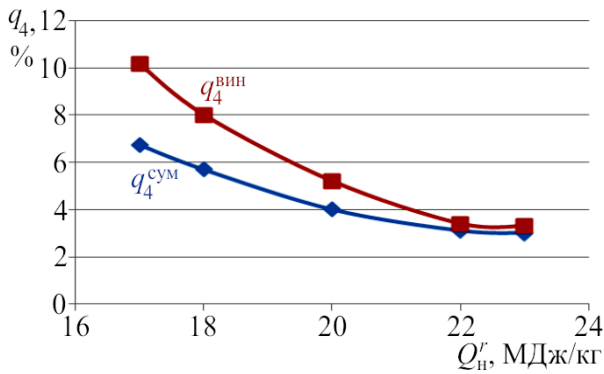


Рис. 2. Залежність втрат теплоти q_4 від нижчої теплоти згоряння вугілля марки АШ в котлі ТП-100:
 $q_4^{сум}$ – втрати теплоти з механічною неповнотою згоряння відносно тепловиділення суміші палив;
 $q_4^{внн}$ – те ж твердого палива

Одним із радикальних заходів зниження втрат теплоти $q_4^{внн}$ є збільшення висоти активної зони горіння в топковій камері залежно від якості спалюваного палива, за якої здійснюється більш повне вигорання вуглецю твердих частинок (рис. 3).

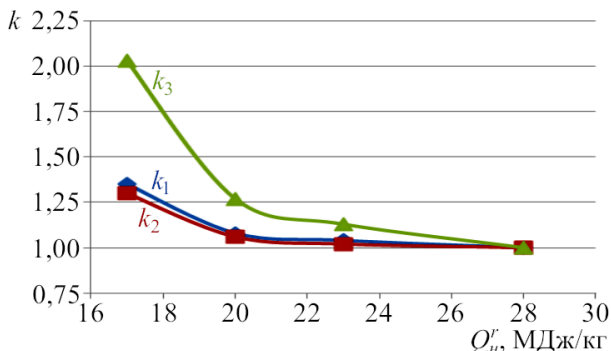


Рис. 3. Відносні розміри топкової камери котлів, розрахованих на спалювання вугілля різної якості:
 k_1 – зони горіння; k_2 – висоти топкової камери;
 k_3 – об'єму топкової камери

Зниження теплоти згоряння палива впливає також на зміну поперечного перерізу топкової камери. Погіршення якості спалюваного палива і зниження його теплоти згоряння приблизно в 1,8 рази потребує збільшення висоти активної зони горіння майже в 1,7 рази а поперечний переріз топкової камери – в 1,6 рази. Відповідно загальний об'єм топкової камери зростає приблизно в 2,3 рази. Таким чином, обмеження на одиничну потужність котлів, крім факторів економічності, екологічності, аварійності маневреності, ремонтпридатності, ефективності використання капітальних вкладень та умов обслуговування і автоматизації, накладає погіршення якості спалюваного палива.

Висока ефективність використання низькосортного палива досягається у котлоагрегатах великої потужності киплячого шару, що ци-

ркулює, за новітніми технологіями термічного перероблення [2]. Особливість зниження втрат теплоти $q_4^{внн}$ полягає в тому, що вугільні частинки спалюються з багаторазовою циркуляцією за рахунок виносного циклона. Така технологія «киплячого шару» вважається перспективною і для теплогенераторів невеликої потужності [7].

За напрямком даної роботи можна виділити наукові праці, у яких висвітлено шляхи досягнення ефективності роботи котлів завдяки вдосконаленню технологічних схем спалювання палива низької якості, зокрема застосування комбінованих схем спалювання. Покращення якості процесу горіння досягають завдяки поєднанню різних способів спалювання: шарового (в сталому або киплячому шарі) і об'ємного (факельного або циклонного). Раціональне спільне застосування схем організації горіння: шахтно-шарового, факельно-шарового, циклонно-факельного тощо з удосконаленими відповідними технологічними стадіями процесу дає можливість розширити діапазон спалюваного палива, зокрема низькосортного.

У механічній топці з шахтно-шаровою схемою горіння [1] ефективне спалювання різних видів палива досягається завдяки поєднанню шахтних процесів за прямоплинною схемою (підготовки і газифікації палива, перетворення вихідного різномірного палива в однорідний кокс) з шаровим процесом горіння палива за поперечною схемою на колосниковій решітці з допалюванням вогнищевих решіток у зоні ефективного механічного шурювання. Ступінь форсування процесу горіння залежить від якості палива, зокрема вмісту дрібних фракцій менше 6 мм.

Паливо з великим вмістом пилових частинок раціонально використовувати в котлах з факельно-шаровою схемою горіння ([9,11,14], рис. 4). У них здійснюється одночасне спалювання великих частинок у шарі на решітці, а дрібних фракцій у зваженому стані – в топковій камері. Суміщення механічної (основної) і пневмомеханічної подачі палива закидувачем до камери згоряння оптимізує об'ємне горіння пилових фракцій та горіння палива в тонкому шарі відповідної висоти на решітці для заданого теплового навантаження. Механізація видалення золи забезпечується ланцюговою решіткою зі зворотним ходом. З метою ефективнішого використання палива різної якості ланцюгову решітку обладнують шурувальною планкою для механічного розпушування шару, що горить. Також пропонується двоярусна топка з функцією розсортування рядового вугілля по фракціям за можливості форсування горіння в шарі [9].

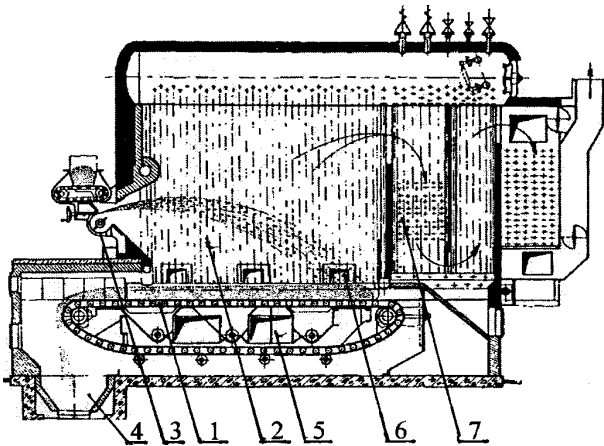


Рис. 4. Схема факельно-шарового спалювання твердого палива [9,11,14]:

1 – ланцюгова колосникова решітка зворотного ходу; 2 – топкова камера; 3 – закидувач палива в топкову камеру і на решітку; 4 – зольник; 5 – дуттьове повітря первинне; 6 – дуттьове повітря вторинне; 7 – конвективний пакет

Підвищення повноти вигорання пилових твердих частинок у факелі і зниження втрат теплоти з неповнотою згорання $q_4^{вип}$ досягається за необхідних великих габаритів камери згорання, що прийнятне для котлів середньої і великої потужності.

Для теплогенераторів невеликої потужності комбіновані технологічні схеми спалювання реалізують в двокамерних топках, зокрема при заміщенні традиційних видів палива (газу, мазуту) твердим паливом з подальшим використанням існуючого котельного устаткування. У цьому випадку первинний і вторинний способи спалювання здійснюються в окремих топкових модулях, які стикуються на місці монтажу. Базовим модулем установки є котел-утилізатор, який включає вторинну топкову камеру з факельним чи вихровим горінням, конвективний пакет, газохід. Первинна топкова камера входить в конструкцію т. зв. передтопка, який включає також топковий пристрій, системи подачі і розподілення дуттьового повітря, паливоподачі, золовидалення та автоматизації керування роботою установки. Різноманітні конструкції передтопок призначені для ефективного використання окремих видів палива з відповідними теплофізичними характеристиками. Приклад компоновки виносної топки (передтопка) з котлом наведено на рис. 5 [4]. У передтопку з перештовхуючими колосниками можна використовувати забаластоване деревне паливо ($W^r = 50-40\%$; $A^r = 10-15\%$). У футерованій первинній топковій камері протікають основні процеси: сушіння і газифікація палива та горіння коксового залишку з утворенням високотемпературних газів з продуктами неповного згорання, допалювання яких здійснюється у вторинній камері факельного горіння.

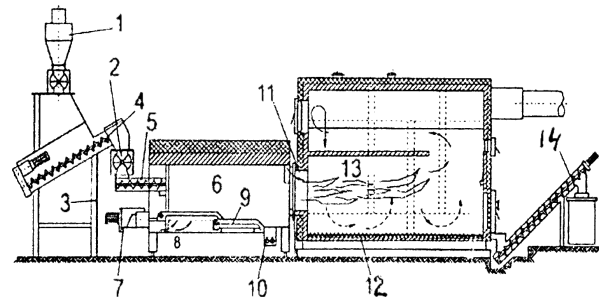


Рис. 5. Схема двокамерного спалювання твердого палива: 1 – бункер паливний; 2 – шлюзова камера; 3 – проміжний резервуар; 4 – шнек дозувальний; 5 – пристрій подачі палива на решітку; 6 – камера первинна; 7 – привід колосникової решітки 9 з рухомими і нерухомими колосниками; 8, 11 – дуттьове повітря: первинне, вторинне (попередньо підігріте); 10, 12, 14 – механічний пристрій видалення золи: з первинної камери, з вторинної камери, з теплогенератора; 13 – камера вторинна (топкова)

Передтопок з нерухою колосниковою решіткою (рис. 6а, [5]) з повітряним охолодженням корпуса призначений для спалювання малозольного палива (тріски, тирси, брикетів тощо), зокрема вологого. Конструкція циклонного вертикального передтопка (рис. 6б, [6]) передбачає сумісне або окреме спалювання за двокамерною схемою природного газу і біомаси у вихровому потоці первинної камери з допалюванням у вторинній камері згорання.

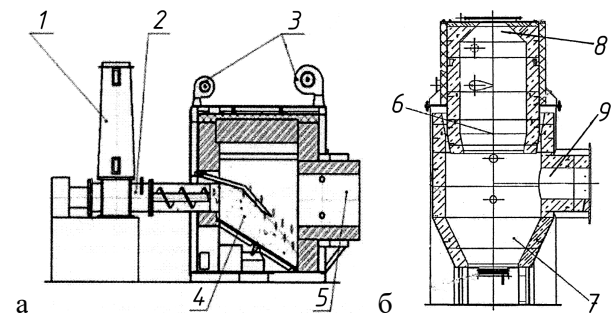


Рис. 6. Схеми передтопок для теплогенераторів з двокамерним спалюванням твердого палива:

- а) передтопок з нахиленою колосниковою решіткою;
 б) передтопок – циклонний палиник; 1 – бункер паливний; 2 – пристрій шнековий подачі палива на решітку; 3 – вентилятори первинного і вторинного повітря; 4 – шар палива; 5 – вихід продуктів згорання у вторинну камеру; 6 – первинна топкова камера; 7 – вторинна топкова камера; 8 – амбразура газового палиника; 9 – вихід в котел-утилізатор

Конструктивна схема твердопаливного теплогенератора «Berkes» [13], крім циклонного передтопка на вході вторинної камери, включає газифікатор палива, гази піролізу з якого подаються в футеровану циліндричну камеру згорання передтопка з вихровим (спіралеподібним) факелом.

Такі модульні твердопаливні теплогенератори є ефективними при використанні різних видів палива відповідно до технологічної схеми передтопка, але є великогабаритними і

потребують великих площ для їх розміщення в котельних. Компактні теплогенераторів отримують за конструкції з вбудованими топковими камерами.

Метою роботи є розробка конструктивної схеми твердопаливного теплогенератора невеликої теплопродуктивності з комплексною організацією топкового процесу із забезпеченням інтенсифікації очищення газів від твердих частинок з високою повнотою їх вигорання на вході конвективних теплообмінних поверхонь.

Виклад основного матеріалу. Можна відмітити, що при пропозиціях промислового ринку різноманітної продукції котельної техніки за дефіциту якісного палива в паливному балансі країни, ефективне використання різних видів твердого палива є важливим завданням. Розвиток технологій використання дешевого твердого палива, зокрема рядового низькосортного, як альтернатива дорогим технологіям виробництва теплової енергії, можна розглядати як один із шляхів зниження залежності від імпорتنих енергоносіїв. У роботі запропоновано технологічну схему спалювання різних видів твердого палива в компактній двокамерній топці теплогенератора невеликої потужності. Така технологічна схема є розвитком конструктивної схеми теплогенератора з камерами згоряння та золоосадження (рис. 7, [1]).

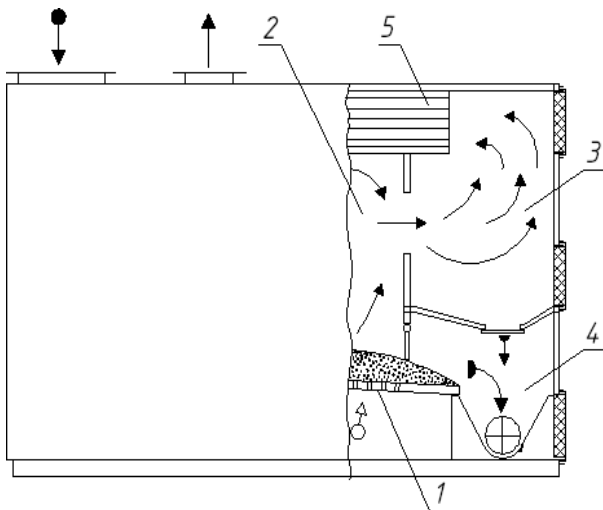


Рис. 7. Схема твердопаливного теплогенератора з золоосаджувальною камерою:

1 – колосникова решітка; 2 – первинна топкова камера;
3 – вторинна топкова камера; 4 – зольник;
5 – конвективний пакет

Умовні позначення на цьому рисунку і далі за текстом:
● → – подача палива; ○ → – первинне повітря; ◻ → – вторинне повітря; —▶ – продукти горіння; —▶ – видалення золи

За цією технологією спалювання передбачено поєднання шахтного і шарового процесів

спалювання палива та надшарового у первинній топковій камері 2 горіння продуктів газифікації паливної шахти у високотемпературному потоці продуктів згоряння палива на колосниковій решітці 1. З камери згоряння газів спрямовуються у вторинну топкову камеру 3, у якій відбувається часткова сепарація твердих частинок з подальшим відведенням їх до зольника 4 теплогенератора.

За відповідних режимних умов та подачі третинного дуттьового повітря на вході вторинної камери підтримується процес горіння у факелі вуглецевих частинок, винесених газами з первинної камери. Більша частка недогорілих і зольних частинок з потоком високотемпературних газів надходять до конвективного пакету 5 і під час експлуатації теплогенератора спричиняють забруднення теплообмінних поверхонь, знижуючи їх теплову ефективність [8, 15]. Крім того, неповнота згоряння вуглецевих частинок знижує ефективність роботи теплогенератора за рахунок втрат теплоти $q_4^{втр}$. Вплив названих факторів на зниження ефективності роботи теплогенератора посилюється за використання рядового низькосортного палива з великим вмістом дрібних фракцій.

Також пропонується вдосконалена технологія двокамерного спалювання (рис. 8) в конструкції твердопаливного теплогенератора невеликої потужності мінімізується негативний вплив названих вище факторів. Така технологія передбачає інтенсифікацію вигорання вуглецевих частинок, винесених газами з первинної топкової камери, та їхньої сепарації з потоку високотемпературних газів на вході конвективних теплообмінних поверхонь.

Конструкція теплогенератора передбачає:

- шахтно-шарову механічну топку з бункером і пристроями паливоподачі (на рисунку не показано);
- первинну топкову камеру над шаром палива, що горить на колосниковій решітці;
- вторинну циклонну камеру (або камери) з вихровим факелом;
- зольник з механічним пристроєм золовидалення;
- колектор третинного повітря на виході газів з первинної камери;
- конвективний пакет;
- газову камеру між циклонною камерою та входом до конвективного пакету;
- патрубок відвідних газів;
- теплоізольовані кришки (люки) для обслуговування газової камери, циклонної камери та зольника.

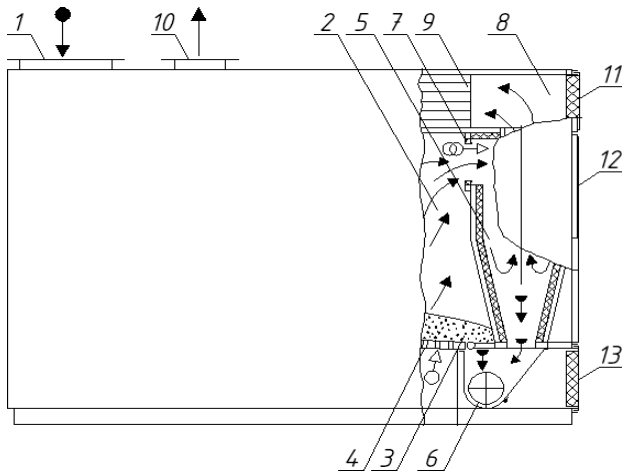


Рис. 8. Схема твердопаливного теплогенератора з циклонною камерою згоряння:

- 1 – бункер топки; 2 – первинна топкова камера; 3 – шар палива, що горить; 4 – колосникова решітка; 5 – вторинна циклонна камера; 6 – зольник; 7 – колектор третинного повітря; 8 – конвективний пакет; 9 – камера газова;
- 10 – патрубок відхідних газів; теплоізолювані кришки для обслуговування; 11 – камери газової;
- 12 – циклонної камери; 13 – зольника

Корпус циклонної камери передбачається водоохолоджуваній, внутрішня поверхня якого покрита футерівкою.

Підвищення економічності роботи за такою технологічною схемою підтверджується розрахунковим аналізом з урахуванням практичного досвіду. На рис. 9 наведено розрахункові залежності коефіцієнта корисної дії твердопаливного теплогенератора потужністю 0,63 МВт при спалюванні за номінального навантаження різних марок вугілля (нижча теплота згоряння: $Q_{нr}^r = 17,25$ МДж/кг, $Q_{нr}^r = 19,38$ МДж/кг, $Q_{нr}^r = 23,03$ МДж/кг; зольність $A^r = 32,20 \dots 14,80$ %) за різних технологічних схем.

За запропонованої схеми з циклонною камерою згоряння розрахункові середні величини приросту коефіцієнта корисної дії теплогенератора за номінального навантаження складають майже 8 % порівняно з однокамерною схемою спалювання та 4 % порівняно зі схемою з камерами згоряння і золоосадження.

Якщо знизити теплове навантаження теплогенератора, уточнені показники роботи можна отримати за експериментальних і налагоджувальних випробувань. Удосконалена двокамерна схема спалювання забезпечує європейські вимоги ефективності роботи теплогенератора на розсортованому малозольному кам'яному вугіллі – розрахунковий ККД не нижче 90 % [17].

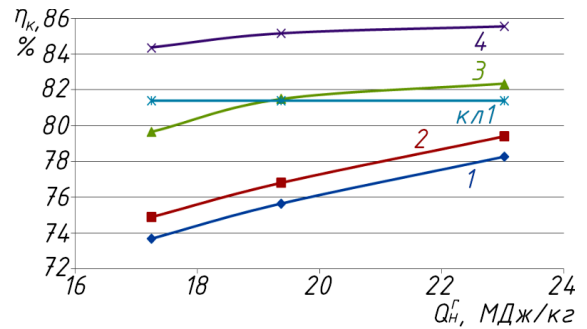


Рис. 9. Розрахункові криві зміни коефіцієнта корисної дії (ККД) твердопаливного теплогенератора по використанню рядового вугілля різної якості за технологічних схем спалювання:

- 1, 2 – однокамерної відповідно за відсутності та наявності механічного очищення конвективних теплообмінних поверхонь; 3 – з камерами згоряння і золоосадження; 4 – з первинною і циклонною вторинною камерами згоряння; кл1 – нормативна величина ККД за першим класом вимог [16]

Така схема з допалюванням пилових частинок та очищення газів від золи на вході конвективного пакету дозволяє підвищити рівень форсування горіння шару в паливній шахті і на колосниковій решітці. Таким чином значно інтенсифікується процес горіння.

Зазвичай, швидкість дуттьового повітря на вході шару, що горить на колосниковій решітці, не перевищує 0,4 м/с. При підвищенні цієї швидкості до 0,6 м/с і збереженні стійкості шару питома швидкість горіння коксу вугілля зростає приблизно в 1,2 рази [18, 19]. Це дає можливість зменшити площу дзеркала горіння, а відповідно зменшити конструктивні габарити первинної камери згоряння.

Зменшення площі дзеркала горіння за заданої потужності теплогенератора покращує умови зниження коефіцієнта надлишку повітря. Відповідно зменшуються непродуктивні втрати теплоти, пов'язані з перевитратою дуттьового повітря.

Висновки. Запропонована конструктивна схема твердопаливного теплогенератора невеликої теплопродуктивності з комплексною організацією топкового процесу із забезпеченням інтенсифікації очищення газів від твердих частинок з високою повнотою їх вигорання на вході конвективних теплообмінних поверхонь є перспективною у підвищенні ефективності роботи котельного обладнання комунальної енергетики.

Література

1. Сенчук М.П. Спалювання низькосортного твердого палива в теплогенераторах систем автономного і децентралізованого теплопостачання / М.П.Сенчук // *Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання: наук.-техн. зб.* – 2018. – Вип. 25. – с. 25-30.
2. Корчевой Ю.П. Новітні технології використання вугілля в енергетиці / Ю.П. Корчевой, Г.Г. Півняк // *Наука та інновації.* – 2006. – Т. 2, № 2. – с. 53-62.
3. Варламов Г.Б. Вплив характеристик непроєктного твердого палива на показники надійності та економічності роботи котельного устаткування / Г.Б. Варламов, А.О. Капустянський // *Енергетика: економіка, технології, екологія.* – 2018. – № 1. – с. 90-98.
4. Передовой опыт в использовании энергии биомассы, в 2-х частях: Комитет по энергоэффективности Беларуси. – Минск, 2006. – 198 с. Режим доступа: https://energoeffekt.gov.by/books_media_campaign/
5. Рогачов В.А.. Аналіз сучасних методів спалювання бурого вугілля в передтопках / В.А. Рогачов, С.А. Рева, М.В. Ванджура // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий.* – 2013. – № 3/8. – с. 50-54.
6. Майстренко О.Ю. Технологія та палик для спалювання біомаси як допоміжного палива в факельних котлоагрегатах / О.Ю. Майстренко, Н.І. Дунаєвська, Я.І. Засядько, Д.Л. Бондзык, Т.С. Щудло, В.Г. Вифатнюк // *Наука та інновації.* – 2013. – Т.8, № 4. – с. 83-88.
7. Чернокрылюк В.В. Твердотопливные котлы с топками «кипящего слоя» / В.В. Чернокрылюк, А.Ф. Редько, А.М. Тарадай, В.А. Сиротенко, Е.С. Есин // *Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання : наук.-техн. зб.* – 2015. – Вип. 18. – с. 30-36.
8. Сенчук М.П. Зниження впливу забруднення поверхонь нагріву твердопаливних теплогенераторів невеликої потужності / М.П. Сенчук, А.М. Рибка, О.І. Юрко // *Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання : наук.-техн. зб.* – 2020. – Вип. 33. – с. 15-21.
9. Вавилов В.И. Исследование эффективности сжигания низкосортного твердого топлива в паровых и водогрейных котлах малой и средней мощности с двухъярусной топкой: автореф. дис. ... канд. техн. наук.: 05.14.04/ В.И. Вавилов; Московский государственный университет. – Москва, 2020. – 24 с.
10. Мадоян А.А. Эффективное сжигание низкосортных углей в энергетических котлах / А.А. Мадоян, В.Н. Балтян, А.Н. Гречаный. – Москва: Энергоатомиздат, 1991. – 200 с.
11. Нечаев Е.В. Механические топки для котлов малой и средней мощности / Е.В. Нечаев, А.Ф. Лубнин. – Ленинград: Энергия, 1968. – 311 с.
12. Твердопаливні котли «Світлобор» (Україна). Режим доступа: <https://domkotlov.by/stati/pelletnye-kotly/unikalnyj-pelletnyj-kotyol-svetlorbor>.
13. Твердопаливні теплогенератори «Verkes» (Англія). Режим доступа: <https://youtu.be/7G5fRVsFLdg>.
14. Бойко Е.А. Котельные установки и парогенераторы / Е. А. Бойко. – Красноярск: Изд-во Красноярского государственного технического университета, 2006. – 292 с.
15. Тепловой расчет котлов (нормативный метод). – Санкт-Петербург: ВТИ, НПО ЦКТИ, 1998. – 257 с.
16. ГОСТ 30735-2001. Котлы отопительные водогрейные теплопроизводительностью от 0,1 до 4 МВт:– Введен с 2003-01-01. – Москва: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2001.–16 с.
17. ДСТУ EN 303-5:2014. Котли опалювальні. Частина 5. Опалювальні котли на твердому паливі з ручним і автоматичним завантаженням топки і номінального теплотворного здатністю до 500 кВт. Термінологія, вимоги, випробування та маркування (EN 303-5:2012? IDT). – Чинні від 01.01.2016. – ДП «УкрНДНЦ», 2014.
18. Основы практической теории горения / Померанцев В.В., Арефьев К.М., Ахмедов Д.Б. и др.; под ред. В.В. Померанцева – Ленинград: Энергоатомиздат, 1986. – 312 с.
19. Senchuk M. P. Simulation of Solid-Fuel Hybrid Combustion / М.П. Сенчук, А.В. Барковський // *Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання: наук.-техн. зб.* – 2017. – Вип. 21. – с. 11-17.

References

1. Senchuk M.P. “Spaliuvannia nyzkosortnoho tverdoho palyva v teploheneratorakh system avtonomnoho i detsentralizovanoho teplopstachannia”. *Ventyliatsiia, osviltennia ta teplohozopostachannia*, 2018. Vyp. 25. s. 25-30.
2. Korchevoi Yu.P., Pivniak H.H. “Novitni tekhnolohii vykorystannia vuhillia v enerhetytsi”. *Nauka ta innovatsii*. 2006. T. 2, № 2. s. 53-62.
3. Varlamov H.B., Kapustianskyi A.O. “Vpliv kharakterystyk neproektnoho tverdoho palyva na pokaznyky nadiinosti ta ekonomichnosti roboty kotelnogo ustatkuvannia”. *Enerhetyka: ekonomika, tekhnolohii, ekolohiia*. 2018. № 1. s. 90-98.
4. *Peredovoi opyt v ispolzovanii energii biomassy, v 2-kh chastiakh*: Komitet po energoeffektivnosti Belarus. Minsk, 2006. URL: https://energoeffekt.gov.by/books_media_campaign/
5. Rohachov V.A., Reva S.A., Vandzhura M.V. “Analiz suchasnykh metodiv spaliuvannia buroho vuhillia v peredtopkakh”. *Vostochno-Europeiskiy zhurnal peredovykh tekhnolohii*. 2013. № 3/8. s. 50-54.
6. Maistrenko O.Yu., Dunaievska N.I., Zasiadko Ya.I., Bondzyk D.L., Shchudlo T.S., Vyfatniuk V.H. “Tekhnolohiia ta palnyk dla spalyuvannia biomasy iak dopomizhnogo palyva v fakelnykh kotloahrehatakh”. *Nauka ta*

innovatsii. 2013. Т. 8, № 4. с. 83-88.

7. Chernokryliuk V.V., Redko A.F., Taradai A.M., Syrotenko V.A., Esyn E.S. “Tverdotoplivnye kotly s topkami «kipiashchego sloia»”. *Ventyliatsiia, osvillennia ta teplohozopostachannia*. 2015. Vyp. 18. s. 30-36.

8. Senchuk M.P., Rybka A.M., Yurko O.I. “Znyzhennia vplybu zabrudnennia poverkhon nahrivu tverdopalyvnykh teploheratoriv nevelykoї potuzhsti”. *Ventyliatsiia, osvillennia ta teplohozopostachannia*. 2020. Vyp. 33, s. 15-21.

9. Vavilov V.I. I Moskovskiyi hosudarstvennyi universytet *ssledovanie efektyvnosti szhiganiia nyzkosortnogo tverdogo topliva v parovykh vodogreinykh kotlakh maloi i srednei moshchnosti s dvukhiarusnoi topkoi*. Diss. abstract. Moskovskiyi hosudarstvennyi universytet, 2020.

10. Madoian A.A., Baltian V.N., Grechanyi A.N. *Effectivnoe szhiganie nizkosortnykh uglei v energeticheskikh kotlakh*. Energoatomizdat, 1991.

11. Nechaiev E.V., Lubnin A.F. *Mekhanicheskie topki dlia kotlov maloi i srednei moshchnosti*. Energiia, 1968.

12. Tverdopalyvni kotly «Svitlobor» (Ukraina). URL: <https://domkotlov.by/stati/pelletnye-kotly/unikalnyj-pelletnyj-kotyol-svetlobor/>

13. Tverdopalyvni teploheratory «Berkes» (Anhliia). URL: <https://youtu.be/7G5fRVsFLdg>.

14. Boiko E.A. *Kotelnye ustanovki i parogeneratory*. Yzd-vo Krasnoiaraskoho hosudarstvennoho tekhnicheskoho unyversyteta, 2006.

15. *Teplovoi raschet kotlov (normativnyi metod)*. Sankt-Peterburh: VTY, NPO TsKTY, 1998.

16. *Kotly otopitelnye vodogreinye teploproizvoditelnosti ot 0,1 do 4 MVt: GOCT 30735-2001*. Mezgho-sudarstvennyi sovet po standartyzatsii, metrologii i sertyfikatsii, 2001.

17. DSTU EN 303-5:2014. *Kotly opaliuvalni. Chastyna 5. Opaliuvalni kotly na tverdomu palyvi z ruchym i avtomatychnym zavantazhenniam topky i nominalnoiu teplotvernoiu zdatsnistiu do 500 kVt. Terminolohiia, vymohy, vuprobuvannia ta markuvannia (EN 303-5:2012? IDT)*. DP «UkrNDNZ», 2014.

18. Pomeranzev V.V., Arefiev K.M., Akhmedov D.B. i dr. *Osnovy prakticheskoi teorii gorenii*. Enerhoatomizdat, 1986.

19. M.P.Senchuk, A.V.Barkovskiy. “Simulation of Solid-Fuel Hybrid Combustion”. *Ventyliatsiia, osvillennia ta teplohozopostachannia*, 2017. Vyp. 21. s. 11-17.

УДК 697.432

Повышение эффективности сжигания твердого топлива в слое

М. П. Сенчук¹

¹к.т.н., доц., Киевский национальный университет строительства и архитектуры, г. Киев, Украина, smp_21@ukr.net.
ORCID: 0000-0001-8968-7336

Аннотация. Проанализированы основные направления повышения эффективности работы твердотопливных теплогенераторов. Отмечено, что в промышленных образцах теплогенерирующих установок в зависимости от их класса применяются различного уровня по капитальным и эксплуатационным затратам технологические схемы сжигания твердого топлива. Приведены примеры реализации таких технологических схем сжигания, на основании результатов теоретических и экспериментальных исследований, в конструкциях твердотопливных теплогенераторов. В работе предложена конструктивную схему теплогенератора небольшой мощности с комбинированной технологией двухкамерного сжигания твердого топлива, в которой объединены слоевой (или шахтного-слоевой) процесс горения со сжиганием в объеме: в первичной камере сгорания над слоем горящего топлива на колосниковой решетке, и во вторичной циклонной камере (или камерах). Благодаря вихревому движению в футерованной вторичной камере высокотемпературных газов с содержанием твердых частиц, вынесенных потоком из зоны горения первичной камеры, происходит как дожигания горючих веществ, так и сепарация зольных частиц с отводом их в зольник теплогенератора. Такая технология сжигания позволяет также повысить форсирование горения слоя на колосниковой решетке, повысить стабильность процесса, уменьшить габариты конструкции. Повышение эффективности работы твердотопливного теплогенератора с двухкамерной топкой достигается благодаря уменьшению потерь тепла с механической неполнотой сгорания углеродных частиц в отходящих газах, а также снижению концентрации зольных частиц в потоке газов на входе конвективных теплообменных поверхностей и соответственно повышение их тепловой эффективности. Это подтверждено расчетными зависимостями эффективности работы механизированного твердотопливного теплогенератора при различных технологических схемах сжигания твердого топлива

Ключевые слова: твердопаливний теплогенератор, технологическая схема сжигания, первичная и вторичная камеры сгорания, циклонная камера сгорания, двухкамерная топка, твердое топливо

UDK 697.432

Increasing the efficiency of burning solid fuel in the layer

M. Senchuk¹

¹PhD, associate professor., Kiev National University of Construction and Architecture, Kiev, Ukraine, smp_21@ukr.net.

ORCID: 0000-0001-8968-7336

Abstract. *The main directions of increasing the efficiency of solid fuel heat generators are analyzed. It is noted that in industrial designs of heat generating installations depending on their class technological schemes of burning of solid fuel are applied at various levels on capital and operational expenses. The most expensive are the technologies of combustion of pre-prepared high-quality fuel in heat generators with complex mechanization at all stages of the combustion process, which provide high thermal and environmental performance. Cheaper combustion technologies are widespread, according to which the normative performance of heat generators is achieved due to the rational ratio of design and mode parameters of the combustion zone with the thermophysical characteristics of the burned fuel, including low-grade. Examples of realization of such technological schemes of combustion on the basis of results of theoretical and experimental researches in designs of solid propellant heat generators are resulted. The paper proposes a constructive scheme of a small-capacity heat generator with a combined technology of two-chamber solid fuel combustion, in which a layered (or shaft-layered) combustion process with combustion in volume is combined: in the primary combustion chamber above the burning fuel layer on the grate, and in the secondary cyclone chamber (or cameras). Due to the vortex motion in the lined secondary chamber of high-temperature gases containing solid particles carried by the flow from the combustion zone of the primary chamber, there is both afterburning of combustible substances and separation of ash particles with their discharge into the ash generator. This combustion technology also allows increasing the forcing of the combustion layer on the grate, increasing the stability of the process and reducing the dimensions of the structure. Improving the efficiency of a solid fuel heat generator with a two-chamber furnace is achieved by reducing heat loss with mechanical incomplete combustion of carbon particles in the exhaust gases, as well as reducing the concentration of ash particles in the gas stream at the inlet of convective heat exchange surfaces and increase their thermal efficiency. This is confirmed by the calculated dependences of the efficiency of the mechanized solid fuel heat generator under different technological schemes of solid fuel combustion*

Keywords: *solid fuel heat generator; technological scheme of combustion, primary and secondary combustion chambers, cyclone combustion chamber, two-chamber furnace, solid fuel*

Надійшла до редакції / Received 23.08.2021