

opment. Part II. Lubricating materials]. Ivano-Frankivsk : Privatne Vydavnytstvo, 2017. 268 p. (Ukr.)

3. Kirichenko V.I., Kirichenko V.V., Nezdorovin V.P. Pererobleniy technishnykh oily na alternatyvni bioprodukty galuzi mastylnich materialiv : Metody ta ych efektyvnist. [The Processing of Industrial Oils for Alternative Bioproducts Lubricants : Methods and their Effectiveness]. *Energotehnologii i resursoberezhennie*. [Energy Technologies and Resource Saving]. 2019, No. 4. pp. 33–43. (Ukr.)

4. Buyanovsky I.A., Fuchs I.G., Shabalina T.I. Granichnay smazka: etapy razvitiya tribologiy. [Border lubrication: stages of development of tribology]. Moscow : Nefty i gaz, 2002. 230 p. (Rus.)

5. Zaslavsky Yu.S. Tribologiy smazoshnich materialiv. [Tribology of lubricants]. Moscow : Khimiya, 1991. 240 p. (Rus.)

6. Czichos H., Habid K.-H. Tribologie-Handbuch: Tribometrie, Tribomaterialien, Tribotechnik. Springer Vieweg, 2015. 794 p.

7. Kajdas Czeslaw, Hiratsuka Ken'ichi. Tribocatalysis, Tribochemistry, Tribocorrosion. Jenni Stanford Publishing, 2018. 322 p.

8. Alekseev P.G, Shcheglova A.V. Vliyanie poverchnostno-aktivnoy sredy na processy deformacionnogo uproshneniy i inosostoykost poverchnostey. [Influence of

the surface-active medium on the processes of deformation simplification and wear resistance of surfaces]. *Trenie i iznos*. [Friction and wear]. 1983. 4 (2). pp. 189–193. (Rus.)

9. Bereznyakov A.I. O vliyanii poliyarnich molekul smazochnogo materiala na silu treniya. [On the influence of polar molecules of lubricant on the friction force]. *Trenie i iznos*. [Friction and wear]. 2001. 22 (5). pp. 513–519. (Rus.)

10. Buyanovsky I.A. Ocenka kineticheskikh charakteristik tribochimicheskikh processov pri granishnoy smazke. [Estimation of kinetic characteristics of tribochemical processes at boundary lubrication]. *Trenie i smazka v machinach i mechanismach*. [Friction and lubrication in machines and mechanisms]. 2006. No. 12. pp. 22–26. (Rus.)

11. Kuksenova L.I., Lapteva I.G., Komakov L.G., Rybakova L.N. Metodi ispitaniy na trenie i iznos. [Friction and wear test methods]. Moscow : Internet-ring, 2001. 152 p. (Rus.)

12. Kyrychenko V.I., Kyrychenko V.V., Ribun V.S., Skladaniuk M.B. Alternative Fuels from Vegetable Oils: Innovative Methods and Technologies of Production and Usage. *Physics and Chemistry of Solid State*. 2020. 21 (3). pp. 552–559.

Received January 17, 2021

УДК 666.2

DOI: 10.33070/etars.1.2021.08

Чернявський М.В., докт. техн. наук,
Мірошніченко Є.С., Провалов О.Ю., канд. техн. наук
Інститут вугільних енерготехнологій НАН України, Київ
вул. Андріївська, 19, 04070 Київ, Україна, e-mail: ceti@i.kiev.ua

Переведення котлів малої та середньої потужності зі щільним шаром на спалювання твердої паливної біомаси

Проаналізовано наявний парк та можливості заміни антрацитових й переведених на природний газ котлів малої та середньої потужності. Обґрунтовано, що реконструкція з переведенням на біомасу доцільна для котлів тепловою потужністю понад 5 МВт. Основна проблема при цьому – зменшення теплосприйняття топкових екранів та збільшення виносу тепла до конвективної шахти за рахунок збільшеної питомої витрати продуктів згоряння біомаси. На основі аналізу зміни характеру топкових процесів та перерозподілу теплообміну в котлі визначено критерії можливості переведення котлів із викопного палива на біомасу з максимальним використанням наявного обладнання. Найбільш прийнятним паливом для цього визнано гранули з агровідходів та відходів деревини. Розроблено та розрахунково

обґрунтовано технічні рішення з реконструкції котла зі щільним шаром паропродуктивністю 20 т/год на антрациті (24 т/год на природному газі) з переведенням на спалювання гранул з біомаси та/або газового вугілля без зміни габаритів топки та без втрати теплової потужності за рахунок компенсації зниженого теплосприйняття топки збільшенням поверхні водяного економайзера з відповідним зменшенням повітропідігрівача. Технічні рішення апробовано при реконструкції 4 котлів «Бабкок-Вількокс» Хоростківського цукрового заводу. Спільне спалювання гранул біопалива з вугіллям реалізовано у діапазоні часток компонентів від 0 до 100 %. При спалюванні гранул недопал у золі-виносі практично відсутній, відкладення золи на конвективних поверхнях самоочищаються за кілька годин роботи на газовому вугіллі. Розробка дала можливість вирішити проблему реновації старих котлів з розширенням їх паливної бази та покращенням екологічних показників за рахунок використання біомаси. *Бібл. 18, рис. 3, табл. 4.*

Ключові слова: вугілля, паливна біомаса, котлоагрегат, спалювання у щільному шарі, теплосприйняття, ТЕЦ, реконструкція котлів.

За даними [1], до 2014 р. загальна кількість котелень у міській та сільській місцевостях орієнтовно становила понад 30 тис. од., а котлів, що виробляли за рік близько 70 тис. Гкал/год теплової енергії та мали сумарну встановлену потужність близько 100 тис. Гкал/год, — 68 тис. од. З урахуванням промислових котелень загальна кількість котлів сягає 80 тис. од.

Основу парку теплової енергетики України складають парові та водогрійні котли малої (теплової потужністю до 11,7 МВт, або паропродуктивністю до 25 т/год) та середньої (23,4–35,0 МВт, або 35–75 т/год) потужності [2]. Значна частина з них — вугільні або переведені на природний газ вугільні котли зі щільним шаром. З припиненням поставок донецького антрациту, з одного боку, та стрімким подорожчанням природного газу для комунальних та промислових потреб, з іншого боку, практично та економічно доступна паливна база цієї частини теплової генерації різко скоротилася. У той же час технічно доступний потенціал агробіомаси в Україні складає понад 11,4 млн т у.п. на рік, деревної біомаси — понад 4,5 млн т у.п. на рік [3]. Використання твердої паливної біомаси у котлах малої та середньої потужності могло б суттєво розширити їх паливну базу.

Впровадження котлів на біомасі в Україні в останні роки розвивається недостатньо активно. Впроваджуються нові котли, від початку розраховані на спалювання біомаси, переважна більшість з них тепловою потужністю до 5 МВт [4]. Застосування нових котлів пов'язане з принциповими відмінностями топкових процесів при спалюванні вугілля та біомаси з причини різного виходу летких речовин та швидкості піролізу, різних розмірів та густини частинок коксозольного

залишку, температур плавкості легкої золи та умов спікливості шлакового залишку, різних питомих витрат продуктів згоряння та вмісту в них смол, тощо. При цьому встановлення нових котлів на біомасі тепловою потужністю понад 5 МВт не під силу більшості комунальних та промислових підприємств, тому актуальною стає задача подовження терміну експлуатації твердопаливних котлів малої та середньої потужності та розширення їх паливної бази завдяки розробці технічних рішень з їх переведення на спалювання твердої паливної біомаси з максимальним використанням наявного обладнання та з урахуванням сучасних технологічних та екологічних вимог.

Стан проблеми

У світі біомаса розглядається як потужна альтернатива викопним паливам, сфера енергетичного використання якої швидко розширюється [5]. Її вважають екологічно чистим паливом у порівнянні з вугіллям. Як правило, вона містить мало сірки, тому емісія сірчистого ангідриду при її спалюванні незначна, а завдяки порівняно невисоким температурам її спалювання супроводжується відносно невеликою генерацією паливних оксидів азоту [6]. Завдяки включенню біомаси у природний цикл поглинання та вивільнення CO₂, спалювання біомаси не призводить до посилення парникового ефекту [7].

В Україні основними придатними для енергетичного використання видами твердої біомаси є деревина, солома рослин та лушпиння соняшнику [8]. У вихідному стані біомаса має низьку насичену щільність і, відповідно, займає великий об'єм (табл. 1). При цьому вихідна вологість сягає 40% і більше, що зменшує її калорійність та

суттєво підвищує витрати на транспортування. Більш зручною формою біомаси є пелети (гранули), які пресуються під тиском до 300 атм з подрібнених деревних (87% в загальному обсязі сировини) та сільськогосподарських відходів. У якості в'язучої речовини виступає складовий компонент рослин – лігнін, що пластифікується

в процесі грануляції під впливом високої температури. Довжина пелет звичайно складає від 10 до 30 мм, діаметр від 6 до 10 мм. При пресуванні пелет видаляється зайва зовнішня волога, внаслідок чого збільшується нижча теплота згоряння (калорійність) палива, а також значно зростають насипна щільність та вологостійкість, що робить пелети зручними для транспортування, зберігання та паливоподачі в енергоустановки.

Основними відмінностями паливної біомаси від вугілля є високий вихід летких речовин, а також високий вміст органічного кисню, що у поєднанні з високою вологою визначає її низьку калорійність (табл. 2) та високий питоми об'єм продуктів згоряння. Крім того, високий вміст оксидів лужних металів у золі визначає низькі температури шлакування поверхонь нагріву котлів, що призводить до частих вимушених зупинок для їх очищення [9].

Таблиця 1. Основні характеристики твердої біомаси [8]

Table 1. Basic characteristics of solid biomass [8]

Тип біомаси / Біопалива	Вміст вологи, %	Густина, кг/м ³	Об'ємна щільність, кг/м ³	Вміст золи, %	Нижча теплота згоряння, МДж/кг
Солома:					
розсіпом (січка)	10–20	–	40–55	3–4	13–15
пресована	10–20	100–140	~100	3–4	13–15
пелети	до 10	1000–1400	550–650	4–5	15–16
Кукурудза:					
стебла	30–35	–	80–90	5	12–14
початки	15–20	–	150–190	5	14–16
Деревина:					
відходи, тріска	40–50	600–800	150–300	0,6–1,5	8–10
пелети	до 10	1000–1400	550–650	0,5–1	17–19
Лушпиння соняшника:					
розсіпом	15	–	90–100	4–5	16
пелети	до 10	1000–1400	550–650	4–7	15–17

Таблиця 2. Технічний аналіз та елементний склад пелет з біомаси [10]

Table 2. Technical analysis and elemental composition of biomass pellets [10]

Пелета	W _t ^r , %	A ^d , %	V ^{daf} , %	Плавкість золи, °C			Q _t ^r , ккал/кг	Вміст на суху беззолну масу, %				
				t _A	t _B	t _C		C	H	O	N	S
Солома пшениці	9,0	12,4	84,2	1130	1180	1350	3442	49,60	6,55	41,56	2,15	0,14
Тріска сосни	6,8	0,8	86,1	1180	1200	1215	4318	52,93	6,64	31,67	2,76	< 0,1
Лушпиння соняшника	10,7	5,8	80,7	>1400	>1400	>1400	4054	53,77	6,38	38,10	1,49	0,26

Примітка. Q_t^r – Нижча теплота згоряння.

Відомо, що при спалюванні біомаси (тріски, лушпиння) в існуючих пилувугільних топках досяжна теплова потужність котла зменшується у 1,5 рази. Котли однакової потужності, спроектовані для спалювання біомаси, мають габарити топки суттєво більші, ніж вугільні, або облаштовані передтопками значних габаритів (типу Шершньова, Померанцева) [11]. Це пов'язане з низькою калорійністю та збільшеною у 1,3–1,5 разів витратою продуктів згоряння, що призводить до зменшення топкових температур та збільшення виводу тепла до пароперегрівача та конвективної шахти.

Досвід експлуатації, сучасні експеримента-

льні [12] та модельні [13] дослідження показують принципові відмінності в організації топкових процесів при спалюванні вугілля та біомаси у щільному шарі. Їх сутність у тому, що вугілля з меншим виходом летких речовин та меншою реакційною здатністю нелеткого залишку значною мірою горить у шарі, для чого потребує більшої витрати окисника під решітку та більшої температури спалювання, що досягається нагрівом повітря до 250–350 °C, при цьому решітку захищає від перегріву шлаковий шар. Біомаса відрізняється значно більшим виходом летких речовин, які згоряють у надшаровому просторі, отже їй потребує значно меншої витрати окисника

під решітку. Її більш реакційний нелеткий залишок не потребує настільки високих температур спалювання у шарі, як вугілля; а низька зольність біомаси нездатна забезпечити захист решітки від перегріву шлаковим шаром. Як наслідок, зменшення температури дуттьового повітря при спалюванні біомаси у щільному шарі є не лише допустимим, а й необхідним.

Визначення критеріїв можливості переведення котлів з вихопного палива на біомасу

Аналіз показав, що основні умови можливості переведення вугільного котла на біомасу без втрати потужності впливають з розподілу необхідного теплотривою по елементах котла та полягають у наступному.

Як зазначалось вище, більша порівняно з вугіллям питома витрата продуктів згоряння та переміщення зони активного тепловиділення до надшарового простору внаслідок більшого виходу летких речовин обумовлюють збільшений винос тепла з топки до конвективної шахти. При цьому теплосприйняття топкових екранів, яке значною мірою визначається випромінюванням, зменшується, а решти елементів котла, яке значною або переважною мірою визначається конвективним теплообміном, зростає.

У парових котлах зі щільним шаром нагрів води відбувається у водяному економайзері, кипіння — у топкових екранах, фестоні та конвективному (кип'ятильному) пучку, перегрів пари — у конвективних пароперегрівачах. При збільшенні частки теплосприйняття конвективних поверхонь при незмінній геометрії топки частка тепла, що припадає на кипіння, зменшується, але вона, за визначенням, не може бути меншою, ніж частка теплоти пароутворення у загальній ентальпії перегрітої пари при заданих температурі та тиску. З цих міркувань випливає, що основним необхідним критерієм можливості переведення котлів з вихопного палива на біомасу без втрати теплової потужності при збереженні габаритів топки є витрата топкових газів при номінальному тепловому навантаженні котла, або, після нескладних перетворень, відношення питомого об'єму продуктів згоряння до калорійності палива, яке становить, $\text{нм}^3/(\text{МДж}/\text{кг})$: для вугілля — 0,4; для пелети з рослинної біомаси — 0,45–0,46; для тріски, соломи, лушпиння — 0,6–0,8. За результатами розрахункових досліджень встановлено, що при температурі топкових газів,

яка не перевищує температуру початку шлакування твердих палив з високим вмістом оксидів лужних та лужноземельних металів у золі $945\text{ }^\circ\text{C}$ [9, 14], допустима величина цього критерію для інших палив не має перевищувати величину для вугілля більше, ніж на 10–15 %. За цим критерієм, переведення на спалювання пелет без втрати потужності при збереженні габаритів топки принципово можливе, а тріски та інших непелетизованих видів біопалива неможливе.

Іншими достатніми умовами такого переведення є забезпечення зниження температури підігріву повітря для підтримання безпечних температур з огляду на уникнення перегріву решітки та шлакування поверхонь на виході з топки та збільшення величини утилізації тепла у водяному економайзері для утримання прийнятної температури відхідних газів при зменшенні відбирання тепла на підігрів повітря.

Розробка технічних рішень з реконструкції котла зі щільним шаром

Значна частина парогенераторів ТЕЦ та котельень у діапазоні паропродуктивності 10–35 т/год представлена котлами, розрахованими на спалювання антрациту у щільному шарі, з параметрами свіжої пари 4 МПа, $440\text{ }^\circ\text{C}$ (рис. 1).

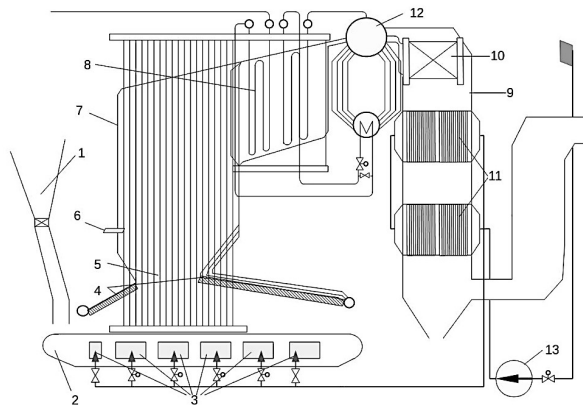


Рис. 1. Принципова схема котла зі щільним шаром для спалювання антрациту на решітці прямого ходу до реконструкції.

Fig. 1. Schematic diagram of a boiler with a dense bed for burning anthracite on the grate of the direct course before reconstruction.

У цих котлах паливо з бункера 1 зсипається на ланцюгову решітку прямого ходу 2, під яку надходить гаряче повітря з секціонованого дут-

тьового коробу 3. Оскільки антрацит є низькорекційним паливом з виходом летких речовин менш 8 %, для його стійкого займання та горіння необхідні високі температури, які забезпечуються, у тому числі, нагрівом дуттьового повітря, яке подається під решітку, до 250–350 °С. З фронту й тилу топки екранні труби утворюють виступи 4, склепіння під якими покриті жаротривкою футерівкою.

Температурний режим займання палива забезпечується випромінюванням розжареної футерівки фронтного склепіння, догорання коксозольного залишку – випромінюванням розжареної футерівки тилового склепіння. Горіння коксового залишку відбувається на решітці, у надшаровому просторі топки 5 легкі речовини й продукти неповного згорання догорають у вторинному повітрі, яке подається через сопла 6.

Оскільки виступи екранних труб та футеровані склепіння забезпечують у нижній частині топки інтенсивне перевипромінювання, температура поверхні шару в зоні активного горіння сягає 1600 °С та більше. Завдяки високій топковій температурі основна частина тепла, що виділяється при спалюванні, сприймається екранними поверхнями топки 7, в результаті температура газів на виході з топкової камери знижується до рівня 900–950 °С, який для антрациту є безпечним по умовах шлакування ширмових пароперегрівачів 8. У конвективній шахті 9 продукти згорання проходять послідовно через водяний економайзер 10, трубчастий повітропідігрівач 11 з двома чи більше ступенями, виводяться через батарейний циклон до димосмоку та скидаються у димову трубу. Шлак падає з протилежного до подачі палива кінця решітки до шлакової ванни, звідки періодично видаляється. Розділення води й пари відбувається у барабанах 12, оснащених розвиненими кип'ятильними пучками, розміщеними у поворотній частині конвективної шахти. Дуттьове повітря у котел подається дуттьовим вентилятором 13. Спалювання високореакційного твердого біопалива у цих котлах супроводжується перегрівом решітки та зниженням теплосприйняття екранами, що, у свою чергу, призводить до зменшення паропроductивності котла та до збільшення температури газів на виході з топкової камери аж до шлакування пароперегрівачів.

Для переведення котлів подібного типу на спалювання твердого біопалива (пелет, гранул) або газового вугілля з максимальним використанням наявного обладнання, без збільшення габаритних розмірів котла та без зменшення паропроductивності розроблено та захищено патентом України «Спосіб переобладнання антрацитового парового котла на спалювання твердого біопалива та/або газового вугілля» [15], який полягає у тому, що існуючу топку облаштовують двома послідовно розташованими бункерами палива з регульованими живильниками, які подають паливо по всій ширині решітки, фронтний й тильовий виступи екранних труб спрямляють, футерівку з труб тилового склепіння знімають, теплосприймаючу поверхню водяного економайзера збільшують у 2–3 рази, а повітропідігрівач зменшують у 4–7 разів, повітропідігрівач переносять з низхідної ділянки конвективної шахти до висхідної ділянки газоходу від конвективної шахти до батарейних циклонів та виконують по оберненій схемі, тобто з проходженням відхідних газів у міжтрубному просторі, а повітря – по трубах, розташованих перпендикулярно потоку газів, а дуттьовий вентилятор розміщують між повітропідігрівачем та дуттьовим коробом та оснащують регульованим шибером присадки холодного повітря, замінюють існуючий димосмок на димосмок у 1,5–1,8 разів більшої продуктивності (рис. 2).

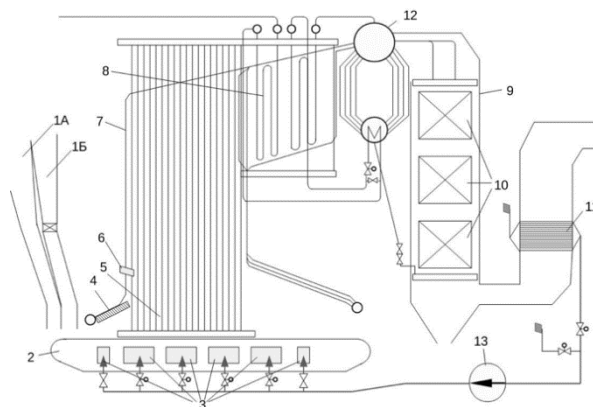


Рис. 2. Принципова схема котла після реконструкції з переведенням на спалювання твердого біопалива та/або газового вугілля.

Fig. 2. Schematic diagram of the boiler after reconstruction with the transfer to the combustion of solid biofuels and/or bituminous coal.

Реконструйований котел працює наступним чином. Паливо подається з одного або з двох бункерів (1А, 1Б) на початкову ділянку решітки прямого ходу, причому при сумісному спалюванні двох видів твердого біопалива або твердого біопалива та газового вугілля кожне з них подається окремо так, що менш реакційне паливо утворює нижній шар на решітці. Займання більш реакційноздатного, ніж антрацит, палива забезпечується розжареною футерівкою фронтного склепіння меншої площини. Леткі речовини, що виходять з палива, та продукти неповного згоряння догорають у надшаровому просторі за рахунок подачі вторинного повітря, а коксовий залишок згорає на решітці у первинному повітрі. Невисока температура підігріву повітря захищає елементи решітки від перегріву. Знижена порівняно з антрацитом температура поверхні шару в зоні активного горіння на 250–350 °С є цілком достатньою для повного вигорання більш реакційноздатного палива, а з точки зору випромінювання вона частково компенсується збільшенням поверхні активного горіння по довжині решітки, видимого дзеркала горіння та теплосприймаючої поверхні екранів. Збільшена питома витрата продуктів згоряння на одиницю наявної теплоти згоряння забезпечує більш низьку порівняно з антрацитом температуру газів на виході з топкової камери, що зменшує ризик шлакування ширмових пароперегрівачів, та збільшує винос тепла до конвективної шахти. Додатково винесене до конвективної шахти тепло топкових газів утилізується в конвективних (кип'ятильних) пучках та у водяному економайзері зі збільшеною теплосприймаючою поверхнею, тому загальне теплосприйняття та паропроductивність котла при тих самих габаритних розмірах не зменшуються порівняно зі спалюванням антрациту. Збільшення температури пари за рахунок підвищеного теплосприйняття у паропідігрівачах компенсується штатним поверхневим пароохолоджувачем, розміщеним між ступенями.

Виконання повітропідігрівача по оберненій схемі збільшує коефіцієнт теплообміну з боку відхідних газів та значно зменшує опір по них, що є вкрай важливим для твердого біопалива зі збільшеною витратою продуктів згоряння на одиницю наявної теплоти згоряння. Невисока (до 70 °С) температура підігріву повітря дає можливість розташувати дуттьовий вентилятор між повітропідігрівачем й дуттьовим коробом та ре-

гулювати температуру повітря шибером присадки холодного повітря на вході вентилятора. При спалюванні палива зі збільшеним вмістом вологи або газового вугілля присадку холодного повітря до дуттьового вентилятора зменшують або повністю закривають.

Впровадження розробленого способу

При переобладнанні раніш переведених на спалювання природного газу антрацитових котлів «Радіант» виробництва фірми «Бабкок-Вількокс» Хоростківського підрозділу ТОВ «Радехівський цукор» паровою продуктивністю 20 т/год на антрациті (24 т/год на природному газі) на спалювання пелет з лущиння соняшника та/або газового вугілля (2019 р.) застосовано розроблений спосіб у комбінації з такими технічними рішеннями [16]:

- зменшення поверхні повітропідігрівача з 660 до 100 м², температури підігріву повітря – з 310 до 50–60 °С;

- збільшення поверхні водяного економайзера від 260 до 610 м²;

- збільшення кількості секцій підрешіткового повітряного коробу з розподілом повітря, який дає можливість «розтягти» зону горіння пелет на 4–5 м активної довжини решітки та збільшити поверхню випромінювання шару;

- застосування сучасних механічних решіток прямого ходу виробництва заводу FPM (м. Мікулов, Польща) замість демонтованих при переведенні на газ;

- обладнання котла двома бункерами сирого палива: один для пелет, другий для газового вугілля – з можливістю незалежного регулювання витрати палива (передбачене почергове спалювання пелет й вугілля з абразивною очисткою золових відкладень від спалювання пелет золою вугілля);

- оснащення котла повітряною імпульсною обдувкою пароперегрівників та водяного економайзера, яка вмикається при збільшенні температури відхідних газів до 200 °С;

- встановлення вискоефективного батарейного циклону з можливістю періодичного повернення уловленої золи на допалювання до топки та рукавних фільтрів для доочищення відхідних газів.

Можливість застосування наведених технічних рішень перевірялася виконанням теплового

розрахунку котла та його елементів згідно з Нормативним методом [17, 18]. При цьому розрахунок топки, фестоу, двох ступенів пароперегрівача та конвективного (кип'ятильного) пучка був повірочним, а водяного економайзера та повітропідігрівача — конструкторським, та мав на меті визначення їх необхідних площин теплосприйняття. При розрахунку величина механічного недопалу приймалася 5 %. Результати розрахунку при номінальному навантаженні котла наведені у табл. 3. Вони підтверджують, що температура топкових газів є меншою за температуру шлакування, а частка теплоти, сприйнята топкою, фестоном та кип'ятильним пучком, є достатньою для забезпечення кипіння води, нагрітої в економайзері до 220 °С. Це обумовило вибір конструкції економайзера — киплячого типу, зі сталевих труб діаметром 32 × 3 мм, розташованих у шаховому порядку.

Таблиця 3. Результати теплового розрахунку елементів котла при роботі на пелетах з лушпиння соняшника

Table 3. The results of thermal calculation of boiler elements when working on pellets of sunflower husk

№№ з/п	Показник	Результати розрахунку
	Температура по ходу газів, °С:	
1	адіабатична температура спалення	1382
2	на виході з топки	913
3	за фестоном	860
4	за пароперегрівачем 2-го ступеню	723
5	за пароперегрівачем 1-го ступеню	565
6	за кип'ятильним пучком	412
7	за водяним економайзером	170
8	за повітропідігрівачем	155
	Частка корисного теплосприйняття, %:	
9	топка	34,8
10	фестон	4,2
11	пароперегрівач 2-го ступеню	8,8
12	пероперегрівач 1-го ступеню	10,0
13	кип'ятильний пучок	10,7
14	водяний економайзер	15,1
15	повітропідігрівач	1,1
	Всього	84,7

Для збереження паропродуктивності котла збільшення об'єму топкової камери та оснащення її передтопками не знадобилося. Для створення підвищених температурних полів для займання палива організовано зону запалення довжиною 1 м «зубом» з труб фронтального екрану топкової камери з натрубною обмурівкою у частині,

що розташована над полотном решітки. Для забезпечення повного вигорання палива та монтажу решітки необхідної продуктивності на котлі відновлено зону охолодження переносом заднього колектору топки та організацією заднього зводу з труб заднього екрану. Сопла вторинного повітря у кількості 6 шт. розміщено над «зубом» переднього екрану. Для газоочистки встановлено комбінацію батарейних циклонів з рукавними фільтрами. Викиди NO_x знижено за рахунок зменшення топкових температур, діоксиду сірки — за рахунок низького вмісту сірки у біопаливі.

Всього було переобладнано 4 з 5 котлів заводу (рис. 3) з повною автоматизацією. Фактичні характеристики котла до й після переобладнання наведені у табл. 4. Котли після реконструкції можуть працювати на гранулах з відходів деревини, з лушпиння соняшника, на пісному, газовому вугіллі або при спільній подачі цих палив. Спільне спалювання вугілля гранул біопалива з вугіллям реалізовано у діапазоні часток компонентів від 0 до 100 %.



Рис. 3. Котли «Радіант» Хоростківського цукрового заводу, переобладнані на спалювання пелет з рослинної біомаси та/або газового вугілля.

Fig. 3. Type “Radiant” boilers of Khorostkiv Sugar Plant, converted to burn pellets of vegetable biomass and/or bituminous coal.

Осіньні сезони 2019 й 2020 рр. котли пройшли безаварійно, стабільно працюючи на пелетах з лушпиння соняшника та газовому вугіллі калорійністю 4400–4500 ккал/кг, при їх роздільній або спільній подачі (вугілля — нижній, пелети — верхній шар на решітці). При спалюванні пелет недопал у золі-виносі був практично відсутній, у зв'язку з чим відкладення золи на конвективних

Таблиця 4. Основні характеристики котла «Радіант» до й після переобладнання
Table 4. The main characteristics of the type "Radiant" boiler before and after reconstruction

Характеристика	До переобладнання	Після переобладнання
Паливо	антрацит	пелети, газове вугілля
Нижча теплота згорання, ккал/кг	5500	3670
Об'єм топкової камери, м ³	130	150
Поверхня відкритих екранів, м ²	120	147
Поверхня економайзера, м ²	260	607
Поверхня повітропідігрівача, м ²	660	100
Продуктивність димосмоку, тис. м ³ /год	55	85
Температура підігріву повітря, °С	300–350	50–70
Температура шару в зоні активного горіння, °С	1600–1650	1300–1400
Температура газів на виході з топки, °С	900–950	850–900
Температура на виході економайзера, °С	160–180	220–240
Температура газів на виході з котла, °С	180–220	150–220
Паропроductивність котла, т/год.	20	20–22
Тиск перегрітої пари, кг/см ²	39	39
Температура перегрітої пари, °С	440	440
Втрати тепла з механічним недопалом, %	10–15	до 5
ККД котла брутто, %	74–79	81–86

поверхнях були пухкими та легко самоочищалися при переході на газове вугілля. Найбільш часто застосованим був режим почергового спалювання, при якому за кілька днів роботи на пелетах температура відхідних газів внаслідок поступового забруднення поверхонь повільно зростала від 150 до 220 °С, а за кілька годин роботи на газовому вугіллі завдяки абразивній очистці поверхонь знову знижувалася до 150 °С. Середній ККД котла брутто при цьому становив 84–85 %, що для цього типу котлів є значно вищим, ніж при роботі на проектному антрациті, та практично таким, як при роботі на газі.

Таким чином, розробка дала можливість вирішити проблему реновації старих котлів, досягнувши високих економічних показників за рахунок переходу на більш дешеве паливо з покращенням екологічних показників за рахунок використання біомаси. Інтерес до тиражування даного досвіду обумовлений наявністю в Україні

кількох тисяч подібних котлів, які на даний час спалюють природний газ.

Висновки

Найбільш придатними для подовження ресурсу з переведенням на спалювання твердої паливної біомаси виглядають антрацитові та переведені на природний газ котли зі щільним шаром паропроductивністю 10–35 т/год, найбільш придатним паливом є пелети з відходів деревини, лушпиння та соломи.

Основні проблеми при переведенні котлів на спалювання біомаси — зменшення теплосприйняття топкових екранів та збільшення виносу тепла до конвективної шахти за рахунок збільшеної порівняно з вугіллям питомої витрати продуктів згорання біомаси, а також перегрів решітки внаслідок відсутності захисного шлакового шару. Ці проблеми вирішуються збільшенням поверхні водяного економайзера з відповідним зменшенням поверхні повітропідігрівача, а також організацією зон займання та догорання на решітці без зміни габаритів топки та збільшенням вторинного дуття.

Розроблені та захищені патентом України технічні рішення з перебудови котлів зі щільним шаром на спалювання пелетизованої біомаси довели свою ефективність при впровадженні на ТЕЦ Хоростківського цукрового заводу та можуть бути рекомендовані для тиражування.

Список літератури

1. Лавренцов Е.М., Сигал І.Я., Смихула А.В., Сигал А.І., Кучин Г.П., Скрипко В.Я., Бькорез Н.І. Реконструкція и модернізація водогрійних и парових котлов отопительных систем теплоснабжения (Обзор). *Енерготехнологии и ресурсозбережение*. 2012. № 3. С. 63–71.
2. Білодід В.Д. Вироблення та споживання теплової енергії в Україні у 2005–2013 роках. *Проблеми загальної енергетики*. 2015. Вип. 1. С. 39–46.
3. Гелетуха Г.Г., Железна Т.А. Стан та перспективи розвитку біоенергетики в Україні. *Промислова теплотехніка*. 2017. Т. 39, № 2. С. 60–64.
4. Баталова О.А., Касенич М.І. Дослідження українського ринку промислових котлів. *Ефективна економіка*. 2014. № 8. — <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=3258>
5. Perea-Moreno M.-A., Sameron-Manzano E., Perea-Moreno A.-J. Biomass as Renewable Energy: Worldwide Research Trends. *Sustainability*. 2019. Vol. 11,

- № 3. P. 863. — <https://doi.org/10.3390/su11030863>
6. Rokni E., Ren X., Panahi A., Levendis Y.A. Emissions of SO₂, NO_x, CO₂, and HCl from Co-firing of coals with raw and torrefied biomass fuels. *Fuel*. 2018, Vol. 211. P. 363–374. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.09.049>
7. Kang S., Selosse S., Maizi N. Contribution of global GHG reduction pledges to bioenergy expansion. *Biomass and Bioenergy*. 2018, Vol. 111. P. 142–153. — <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.05.017>
8. Гелетуха Г.Г., Жовмір М.М., Олійник Є.М., Радченко С.В. Біомаса як паливна сировина. *Промислова теплотехніка*. 2011. Т. 33, № 5. С. 76–84.
9. Матвійчук О.С., Рудавіна О.В., Чернявський М.В. Експериментальне дослідження фізико-хімічних і теплотехнічних властивостей соломи та лушпиння як твердого біопалива. *Відновлювана енергетика*. 2012. № 1. С. 58–66.
10. Dunaievskaya N., Chernyavskiy M., Shchudlo T. Co-combustion of solid biomass in pulverized anthracite-coal firing boilers. *Ukrainian Food Journal*. 2016. Vol. 5. Iss. 4. P. 748–764. DOI: 10.24263/2304-974X-2016-5-4-14
11. Александров В.Г. Паровые котлы малой и средней мощности. Л. : Энергия, 1972. 200 с.
12. Buchmayr M., Gruber J., Hargassner M., Hochbauer C. Experimental investigation of the primary combustion zone during staged combustion of wood-chips in a commercial small-scale boiler. *Biomass and Bioenergy*. 2015. Vol. 81. P. 356–363. — <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.07.016>
13. Gomez M., Portero J., de la Guesta D., Patino D., Miguez J.L. Numerical simulation of the combustion process of a pellet-drop-feed boiler. *Fuel*. 2016, Vol. 184. P. 987–999. — <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.11.082>
14. Alekhovich A.A. Current research on the slagging properties of coals and slagging in boilers. *Power Technol. Eng.* 2012. № 45. P. 441–446. — <https://doi.org/10.1007/s10749-012-0291-3>.
15. Пат. 143012 Укр., МПК F 23 C 1/00, 7/00. Спосіб переобладнання антрацитового парового котла на спалювання твердого біопалива та/або газового вугілля. Є.С.Мірошніченко, М.В.Чернявський, А.І.Росколуца. № u201912050, заявл. 19.12.2019, опубл. 10.07.2020, Бюл. № 13.
16. Мирошніченко Е.С., Чернявський Н.В., Дунаевская Н.И. Опыт реконструкции котлоагрегатов ТЭС и ТЭЦ в Украине и возможности его использования в условиях Республики Казахстан. Международ. конф. «Угольная теплоэнергетика в Казахстане : Проблемы. Решения. Перспективы развития» (Нур-Султан, 27–28.02.2020). С. 62–66. — URI: <http://nur.nu.edu.kz/handle/123456789/4938>
17. Тепловой расчет котлов (Нормативный метод). Под ред. Г.М.Кагана. Санкт-Петербург : ОАО «ВТИ», НПО ЦКТИ, 1998. 259 с.
18. Тепловой расчет промышленных парогенераторов. Под ред. В.И.Частухина. Киев : Вища школа, 1980. 182 с.

Надійшла до редакції 26.02.2021

**Chernyavskyy M.V., Doctor of Technical Sciences,
Miroshnychenko Ye.S., Provalov O. Yu., Candidate of Technical Sciences
Coal Energy Technology Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Kiev**

19, Andriivska Str., 04070 Kiev, Ukraine, e-mail: ceti@i.kiev.ua

Conversion of low and medium power boilers for combustion of solid fuel biomass

The paper analyzes the existing fleet and the possibilities of replacing anthracite and natural gas boilers of low and medium capacity and substantiates that the reconstruction with conversion to biomass is appropriate for boilers with a thermal capacity of more than 5 MW. The main problem is the reduction of heat perception of furnace screens and increase of heat removal to the convective pass due to the increased specific yield of biomass combustion products. Based on the analysis of changes in the nature of combustion processes and redistribution of heat exchange in the boiler, it was determined the criteria for the possibility of converting boilers from fossil fuels to biomass with maximum use of available equipment and the most acceptable fuel for this - agricultural pellets and wood waste. Technical solutions for the reconstruction of a boiler with a dense bed with a steam capacity of 20 t/h on anthracite (24 t/h on natural gas) have been developed and calculated with

transfer to burning of granules of biomass and/or gas coal without change of dimensions of a fire chamber and without loss of thermal power due to compensation of the lowered heat absorption of a fire chamber by increase of a surface of a water economizer with corresponding decrease in an air heater. Technical solutions were used during the reconstruction of 4 boilers "Babcock-Wilcox" of Khorostkiv Sugar Plant. Co-combustion of biofuel pellets with coal is implemented in the range of components share from 0 to 100%. When burning granules, underburning in the fly ash is almost absent, ash deposits on convective surfaces are self-cleaning for several hours of work on gas coal. The solutions developed allowed to solve the problem of renovation of old boilers with the expansion of their fuel base and improvement of environmental performance through the use of biomass. *Bibl. 18, Fig. 3, Tab. 4.*

Keywords: coal, fuel biomass, boiler unit, dense bed combustion, heat perception, CHP, reconstruction.

References

1. Lavrentsov E.M., Sigal I.Ya., Smikhula A.V., Sigal A.I., Kuchin G.P., Skripko V.Ya., Bykorez V.I. [Reconstruction and modernization of hot water and steam boilers of heating systems of heat supply (Review)]. *Ecotechnologii i Resursoberezhenie. [Ecotechnologies and Resource Saving]*. 2012. No. 3. pp. 63–71. (Rus.)
2. Bilodid V.D. [Production and consumption of thermal energy in Ukraine in 2005–2013]. *Problemy zahal'noyi enerhetyky. [Problems of general energy]*. 2015. Iss. 1. pp. 39–46. (Ukr.)
3. Geletukha G.G., Zhelezna T.A. [State and prospects of bioenergy development in Ukraine]. *Promyslova teplotekhnika. [Industrial heat engineering]*. 2017. 39 (2). pp. 60–64. (Ukr.)
4. Batalova O.A., Kasenich M.I. [Research of the Ukrainian market of industrial boilers]. *Efektivna ekonomika. [Effective economy]*. 2014. No. 8. — <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=3258> (Ukr.)
5. Perea-Moreno M.-A., Sameron-Manzano E., Perea-Moreno A.-J. Biomass as Renewable Energy: Worldwide Research Trends. *Sustainability*. 2019, 11 (3), pp. 863. — <https://doi.org/10.3390/su11030863>
6. Rokni E., Ren X., Panahi A., Levendis Y.A. Emissions of SO₂, NO_x, CO₂, and HCl from Co-firing of coals with raw and torrefied biomass fuels. *Fuel*. 2018, Vol. 211. pp. 363–374. — <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.09.049>
7. Kang S., Selosse S., Maizi N. Contribution of global GHG reduction pledges to bioenergy expansion. *Biomass and Bioenergy*. 2018. Vol. 111. pp. 142–153. — <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.05.017>
8. Geletukha G.G., Zhovmir M.M., Oliynyk E.M., Radchenko S.V. [Biomass as a fuel raw material]. *Promyslova teplotekhnika. [Industrial heat engineering]*. 2011. 33 (5). pp. 76–84. (Ukr.)
9. Matviychuk O.S., Rudavina O.V., Chernyavsky M.V. [Experimental study of physicochemical and thermal properties of straw and husk as a solid biofuel], *Vidnovlyuvana enerhetyka. [Renewable energy]*. 2012. No. 1. pp. 58–66. (Ukr.)
10. Dunaievska N., Chernyavskiy M., Shchudlo T. Co-combustion of solid biomass in pulverized anthracite-coal firing boilers. *Ukrainian Food Journal*. 2016. Vol. 5. Iss. 4. pp. 748–764. DOI: 10.24263/2304-974X-2016-5-4-14
11. Alexandrov V.G. [Steam boilers of small and medium power]. Leningrad : Energiya, 1972. 200 p. (Rus.)
12. Buchmayr M., Gruber J., Hargassner M., Hochenauer C. Experimental investigation of the primary combustion zone during staged combustion of wood-chips in a commercial small-scale boiler. *Biomass and Bioenergy*. 2015. Vol. 81. pp. 356–363. — <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.07.016>
13. Gomez M., Portero J., de la Cuesta D., Patino D., Miguez J.L. Numerical simulation of the combustion process of a pellet-drop-feed boiler. *Fuel*. 2016. Vol. 184. pp. 987–999. — <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.11.082>
14. Alekhnovich A.A. Current research on the slagging properties of coals and slagging in boilers. *Power Technol. Eng.* 2012. No. 45. pp. 441–446. — <https://doi.org/10.1007/s10749-012-0291-3>
15. Pat. 143012 Ukraine, IPC F 23 C 1/00, 7/00. [Method for conversion of anthracite steam boiler for combustion of solid biofuel and/or bituminous coal]. E.S.Miroshnichenko, M.V.Chernyavskyy, A.I.Roskolupa. No. u201912050, application 19.12.2019, publ. 10.07.2020, Bull. 13. (Ukr.)
16. Miroshnichenko E.S., Chernyavskyy N.V., Dunaevskaya N.I. [Experience of reconstruction of boiler units of thermal power plants and combined heat and power plants in Ukraine and possibilities of its use in the conditions of the Republic of Kazakhstan]. *Intern. Conf. «Ugol'naya teploenergetika v Kazakhstane : Problemy. Resheniya. Perspektivy razvitiya» [“Coal power engineering in Kazakhstan : Problems. Solutions. Development prospects”]*, Nur-Sultan, 27–28.02.2020, pp. 62–66. — URI: <http://nur.nu.edu.kz/handle/123456789/4938> (Rus.)
17. [Thermal calculation of boilers (Standard method)]. Ed. G.M.Kagan. St. Petersburg : JSC “VTI”, NPO CKTI, 1998. 259 p. (Rus.)
18. [Thermal calculation of industrial steam generators]. Ed. V.I.Chastukhin. Kiev : Vishcha shkola, 1980. 182 p. (Rus.)

Received February 26, 2021