

УДК 621.311:628.492

АНАЛІЗ ПОРІВНЯННЯ РІЗНИХ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ТВЕРДОПАЛИВНИХ КОТЛІВ

Ткаченко Станіслав Йосипович д.т.н., професор
Дахновська Ольга Вікторівна аспірантка
Вінницький національний технічний університет
Tkachenko S.
Dahnovska O.
Vinnitsia National Technical University

Анотація: в статті проаналізовані різні методи визначення енергоефективності твердопаливних водогрійних котлів малої потужності.

Ключові слова: коефіцієнт корисної дії котла, тверде паливо, котли малої потужності, втрати теплоти, зворотній баланс, доступний контроль.

Вступ

В теплоенергетиці використовуються два підходи до визначення коефіцієнта корисної дії (ККД) котлів: по прямому та зворотньому тепловому балансу. Для водогрійних котлів на природному газі ККД можна визначити за допомогою спеціальних приладів – газоаналізаторів. Експрес-методів визначення ККД твердопаливних котлів авторами не знайдено. Не описана також чітко методика теплотехнічних випробувань таких котлів. Авторами [1] розглянуто особливості теплотехнічних випробувань водогрійних котлів ємкісного типу з періодичним спалюванням цілих тюків соломи з визначенням поточних та усереднених значень теплових втрат котла та його коефіцієнта корисної дії. Інформація стосовно теплотехнічних випробувань водогрійних котлів, що працюють на брикетах деревини та на антрациті відсутня.

Показником ефективності роботи котла є коефіцієнт корисної дії котла (ККД). *Коефіцієнт корисної дії* – це відношення корисно використаної теплоти до всієї затраченої теплоти, що вноситься в топку котла при спалюванні палива[2]. Не вся корисна теплота, що виробляється котлоагрегатом, йде до споживачів, частина теплоти витрачається на власні потреби. З урахуванням цього розрізняють ККД по виробленій теплоті (ККД бруто) і по відпущеній теплоті (ККД нетто). Витрата на власні потреби визначається як різниця між виробленою і відпущеною теплотою. На власні потреби витрачається не тільки теплота, але й електрична енергія (наприклад, на привід димососа, вентилятора, живильних насосів, механізмів подачі палива, тощо).

Основна частина

В результаті, ККД бруто котла характеризує ступінь його технічної досконалості, а ККД нетто – комерційну економічність. За рівнянням прямого балансу ККД бруто визначається за формулою (1):

$$\eta_z = \frac{Q_{\text{кор}}}{Q_{\text{зат}}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

де $Q_{\text{кор}}$ – кількість корисно використаної теплоти, МДж/кг; $Q_{\text{зат}}$ – затрачена теплота, МДж/кг.

За рівнянням зворотного балансу ККД бруто визначається за формулою(2):

$$\eta = 1 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6), \quad (2)$$

де q_2 – втрати теплоти з відхідними газами; q_3 – втрати теплоти від хімічної неповноти згорання палива; q_4 – втрати теплоти від механічної неповноти згорання палива; q_5 – втрати теплоти від зовнішнього охолодження; q_6 – втрати теплоти з фізичною теплотою шлаків, які видаляються з топки.

Оцінимо втрати теплоти для котлів, які працюють на твердому паливі. Втрати теплоти з

відхідними газами q_2 є основними і залежать від виду палива, температури відхідних газів, організації процесу спалювання в топці і конструктивних особливостей котла. Враховуючи нижчу рекомендовану температуру відхідних газів з [3] 150°C і максимальну допустиму по ДСТУ2326-93 [4] при спалюванні деревини 300°C втрати q_2 будуть знаходитися в межах 9 – 25 %.

Згідно з [3] втрати теплоти від хімічної неповноти згорання палива зумовлені сумарною теплотою згорання продуктів неповного згорання, що залишаються у відхідних газах. При спалюванні деревини в камерних топках q_3 знаходиться в межах 0,05 – 1 %.

Втрати q_4 складаються з трьох величин: недопалу палива, провалу і золи, що випадає в бункер з газоходу і золовловлювачів, а також при виносі золи, що покидає котельний агрегат через димову трубу [4]. Згідно [3] при спалюванні деревини q_4 знаходиться в межах 0,05 – 5 %.

Трембовля В. І. [5] зазначає, що втрати теплоти в навколишнє середовище за рахунок природної конвекції і випромінювання зовнішніми поверхнями котла (обмурівкою і металевими частинами) змінюються в залежності від теплового навантаження котла. При збільшенні навантаження втрати q_5 (віднесена до 1 кг палива) зменшується. Із ДСТУ 2326-93 [4] діапазон втрат теплоти від зовнішнього охолодження для водогрійних котлів потужністю до 100 кВт знаходиться в межах від 1,5 до 2,5%.

Втрати теплоти з фізичною теплотою шлаків вводяться в розрахунок для всіх твердих палив при камерному спалюванні з рідким шлаковидаленням і шаровому спалюванні. При камерному спалюванні з твердим шлаковидаленням q_6 може не враховуватися при робочій зольності палива $A^p \leq \frac{Q_H^p}{100}$.

Підсумовуючи всі втрати, отримуємо, що ККД котлів потужністю до 100кВт, що працюють на деревині складатиме в середньому 82 – 90%.

Процес спалювання потребує високого рівня контролю. В патенті [6] авторами запропоновано спосіб регулювання окремих або всіх факторів, впливаючих на згорання палива на колосниковій решітці шляхом радарного вимірювання. Даний спосіб потребує значних грошових вкладень та відноситься до промислової енергетики великої потужності.

Для котельних невеликої потужності (побутових чи промислово-побутових) встановлення великої кількості контрольно-вимірювальних приладів є нераціональним із економічної точки зору. Але для ефективної роботи котельні необхідно встановити певну кількість приладів для вимірювання теплотехнічних показників: манометр для вимірювання тиску води на виході з котла, термометри для вимірювання температури води на вході і на виході з котла та температури відхідних газів, датчик розрідження для вимірювання розрідження в топці і на виході з котла, тепловий лічильник – вимірювання теплової потужності на виході з котла, лічильник води для вимірювання витрати підживлювальної води, газоаналізатор – вимірювання викидів, ККД котла та регулювання співвідношення “паливо – повітря”.

Відсутність лабораторій для дослідження характеристик палива (вологи, насипної щільності, зольності), характеристик золи ускладнює організацію доступного контролю практично на всіх об'єктах малої енергетики.

Тому *метою статті* є методичне забезпечення організації доступного контролю практично на всіх об'єктах малої енергетики з метою підвищення енергоефективності малих об'єктів, зменшення техногенного навантаження.

Теплотехнічні вимірювання, які проводяться з метою визначення енергетичних характеристик роботи котлів (ККД, потужності, втрат тепла, тощо) відносяться до першої групи вимірювань [5].

Порівняння різних методів визначення коефіцієнту корисної дії водогрійного твердопаливного котла здійснювали: за методикою [7], експериментальними дослідженнями [8], за паспортними значеннями, розрахунково за зворотнім балансом, розрахунок граничних значень ККД за зворотнім балансом.

Для експериментального визначення теплотехнічних характеристик котла використовують сучасні багатофункціональні газоаналізатори або тестери. Методика, за якою обробляються виміряні

характеристики і визначається ККД аналізатором наведена в [7].

Алгоритм визначення ККД за методикою [7]:

1. Вихідні дані: виміряне газоаналізатором CO_2 , температура димових газів, температура повітря, що бере участь при спалюванні, виміряне CO , теоретичне значення CO_2 .

2. Визначення втрат теплоти з відхідними газами в [7] за формулами (3,4):

- якщо відома концентрація вільного кисню в димових газах:

$$P_s = \left(\frac{A_1}{21 - O_2} + B \right) \varphi (T_f - T_a), \quad (3)$$

- якщо відома концентрація вуглекислого газу в димових газах:

$$P_s = \left(\frac{A_2}{\text{CO}_2} + B \right) \varphi (T_f - T_a), \quad (4)$$

де T_f – температура димових газів на виході з котла, °C; T_a – температура повітря, яке приймає участь в спалюванні, °C; O_2 – концентрація кисню в сухих димових газах, %; CO_2 – концентрація вуглекислого газу в сухих димових газах, %; A_1 , A_2 , B – емпіричні коефіцієнти. Для розрахунку ККД водогрійного твердопаливного котла користувались формулою (3). Емпіричні коефіцієнти приймали $A_1 = 0,765$ та $B = 0$ згідно [9] для палива - дерева.

3. Розрахунок ККД за формулою (5):

$$\varepsilon = 100 - P_s \pm 2\%, \quad (5)$$

де P_s – теплова потужність, яка втрачається з відхідними газами, %; $\pm 2\%$ – допуск, пов'язаний з неточністю вимірювань і зчитуванням результатів.

Дана методика застосовується для обробки результатів вимірювань котлів, які працюють на рідкому та газоподібному паливі. Авторами проведено дослідження застосування методики [7] для твердопаливного котла на брикетах деревини та антрациті.

Для порівняння методів визначення енергоефективності твердопаливних котлів використали експериментальні результати дослідників [9]. Дослідження проводились на твердопаливному котлі марки Logica фірми Vuderus теплопродуктивністю 70 – 78 кВт. В якості палива було використано брикети деревини зі складом палива: $C^p=43,9\%$; $H^p=5,3\%$; $O^p=37,3\%$; $N^p=0,5\%$; $A^p=1\%$; $W^p=12\%$ та антрацит зі складом палива: $C^p=79,9\%$; $H^p=1,6\%$; $O^p=1,4\%$; $N^p=0,8\%$; $A^p=9,8\%$; $S^p=2\%$; $W^p=4,5\%$. В обох випадках спалювання паливо завантажували у розмірі 100 кг. ККД котла із паспортних даних становить (78,6 – 81,3)% при вологості палива 25% [10].

Визначення ККД котлів потужністю до 100 кВт, які працюють на твердому паливі може здійснюватись зведенням зворотнього балансу (визначенням всіх втрат тепла) [5] або безпосереднім зважуванням палива.

Алгоритм визначення ККД за зворотнім балансом:

1. Вихідні дані : елементний склад палива, коефіцієнт надлишку повітря в топці α , температура відхідних газів $t_{вг}$, температура повітря $t_{пов}$.

2. Визначення об'ємів та ентальпій продуктів згорання – розрахунок за відомими формулами [3].

3. Складання теплового балансу котла та визначення ККД. Втрати теплоти від хімічної неповноти згорання палива q_3 , втрати теплоти від механічної неповноти згорання q_4 , втрати теплоти в навколишнє середовище q_5 приймали за усередненими даними із [3-5], q_2 – розраховували за [3].

Для визначення граничних значень ККД за зворотнім балансом приймали граничні значення втрат q_3 , q_4 та q_5 для розрахунку верхньої та нижньої межі ККД за [3,4]. Втрати q_2 – розраховували за алгоритмом розрахунку ККД за зворотнім балансом.

На рис.1 наведено залежність значення ККД водогрійного котла від часу випробування τ при спалюванні брикетів деревини та антрациту відповідно. Відібрані режими, коли котел працював на номінальному навантаженні.

Середнє експериментальне ККД котла на брикетах деревини за весь період вигорання

становить $\eta_{\text{сер}} = 49\%$. Граничні межі ККД котла за зворотнім балансом на брикетах деревини $\eta_{\text{мін}} = 78\%$, $\eta_{\text{макс}} = 89,5\%$, на антрациті – $\eta_{\text{мін}} = 76,5\%$, $\eta_{\text{макс}} = 83,5\%$. Для кожного котла можна розрахувати свої граничні межі ККД. При значному відхиленні ККД від даних значень необхідно звернути увагу на регулювання тяги і дуття, контроль стану поверхонь нагріву і їх своєчасне очищення, контроль стабільного горіння і повноти згорання палива.

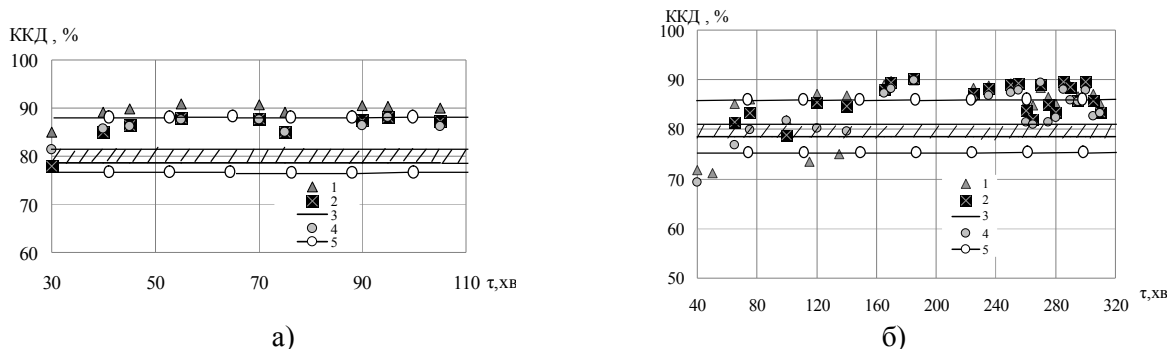


Рис. 1. Значення ККД водогрійного котла: а) на брикетах деревини; б) на антрациті; 1 – за методикою [7]; 2 – за приладом; 3 – межі зміни ККД за паспортними даними; 4 – за зворотнім балансом; 5 – граничні значення ККД за зворотнім балансом

При спалюванні брикетів деревини (рис. 1а) значення коефіцієнта корисної дії за приладом та за зворотнім балансом мають похибку до 0,5%. Так як паспортні значення котла розраховувались для палива вологістю 25%, а експериментальне паливо – брикети деревини мають вологість 12%, відповідно ККД буде більшим, тому визначати коефіцієнт корисної дії твердопаливних котлів потужністю до 100 кВт газоаналізатором та за зворотнім балансом автори вважають доцільно. При спалюванні антрациту (рис. 1б) значення коефіцієнта корисної дії за приладом та за зворотнім балансом мають похибку до 2%, при цьому вологість палива становить 4,5%, на відміну від палива, що подається в паспорті котла.

При розрахунках ККД за методикою [7] для котлів на твердому паливі необхідно врахувати втрати теплоти від хімічної неповноти згорання q_3 , втрати теплоти від механічної неповноти згорання q_4 , втрати теплоти від зовнішнього охолодження q_5 і втрати теплоти з фізичною теплою шлаків q_6 . Розходження коефіцієнту корисної дії по методиці [7] та за газогенератором і за зворотнім балансом при спалюванні брикетів деревини становить (2,5 – 4)%, на антрациті відхилення більше і становить до 5%. Це пов'язано з тим, що при розрахунках приймали емпіричні коефіцієнти A_1 та B для деревини із [9], так як для антрациту не зазначено, які необхідно вибирати коефіцієнти. Тому методику [7], за якою обробляються виміряні характеристики твердопаливного котла і визначається ККД котла газоаналізатором для комерційних розрахунків автори не рекомендують застосовувати, але можна використовувати для наладки режимів котла в процесі експлуатації.

Висновки

Співставлені методи визначення коефіцієнту корисної дії твердопаливного котла по методиці [7] з експериментальними результатами [8], за паспортними значеннями, за зворотнім балансом котла та із граничними значеннями ККД за зворотнім балансом.

Визначено, що при номінальному режимі котла при спалюванні брикетів деревини значення ККД по приладу та за зворотнім балансом мають розбіжність до 0,5%, при спалюванні антрациту до 2%. Паспортні значення котла розраховувались для палива вологістю 25%, а паливо, застосоване в експериментах – брикети деревини мають вологість 12%, антрацит 4,5%, відповідно розрахункове ККД мають більші значення. Тому визначати коефіцієнт корисної дії твердопаливних котлів потужністю до 100 кВт газоаналізатором та за зворотнім балансом автори вважають доцільно.

Для наладки режимів котлів невеликої потужності до 100 кВт в процесі експлуатації також вважаємо доцільним застосовувати методику [7].

Список літератури

1. Гелетуха Г. Г. Особенности теплотехнических испытаний водогрейных котлов с периодическим сжиганием целых тюков соломы / Г. Г. Гелетуха, М. М. Жовмір, Є.М.Олійник / Промислова теплотехніка, 2010, т. 32, №6. – С.45 – 51.
2. Стырикович М. А. Котельные агрегаты / М. А. Стырикович, К. Я. Катковская, Е. П. Серов – М. : Энергия, 1959. – 488 с.
3. Тепловой расчет котлов (Нормативный метод). Изд. 3-е. – НПО ЦКТИ, СПб, 1998. – 256с.
4. Котли опалювальні водогрійні теплопродуктивністю до 100 кВт. Загальні технічні умови: ДСТУ 2326-93. – [Чинний від 1995-01-01]. – К. : Держстандарт України, 1994. – 17 с. – (Державний стандарт України).
5. Трёмбовля В. И. Теплотехнические испытания котельных установок / В. И. Трёмбовля, Е. Д. Фингер, А. А. Авдеева. – М. : Энергия, 1977. – 296 с.
6. Пат. 26159 МПК F23N 3/00 Спосіб регулювання окремих або всіх факторів, впливаючих на згоряння палива на колосниковій решітці / Мартін Йоханнес Йозеф Едмунд, Хорн Йоахім, Рампп Франц. – Опубл. 07.06.99.
7. Справочник компании RIELLO Алфавит горения [Электронный ресурс] Режим доступа <http://rielo.ru/azbuka>.
8. Юзюк А. О. Показники котла в умовах повного вигорання твердого палива після разового завантаження / А. О. Юзюк, Б. В. Хабінець / Энергетика та електрифікація. – 2012. – № 8. – С.3 – 6.
9. Руководство по эксплуатации анализаторов дымовых газов testo 327. Режим доступа <http://www.energo-snab.ru/upload/iblock/7ee/7ee065dbc64262b4bbec7b18fa96f736.pdf>
10. Руководство и установка LOGICA Котел твердотопливный, стальной [Электронный ресурс] Режим доступа www.tetan.ua.

References

1. Heletuha H. H. Features thermal testing boilers with periodic burning whole bales of straw / H. H. Heletuha, M. M. Govmir, Y. M. Oliynuk / Industrial heat ,2010, v.32, №6. –P.45 – 51.
2. Sturikovich M. A. Boiler aggregates / M. A. Sturikovich, K. Y. Katkovskaya, E. P. Serov – M. : Energy, 1959. – 488 p.
3. Calculations of thermal boilers (Standarts method). Ed.3-rd. – NPO ZKTI, SPb, 1998. – 256 p.
4. Boilers fired heating capacity of 100 kW. General specifications : GOST 2326-93 . - [Effective as of 01.01.1995]. - K : State Standard of Ukraine, 1994. - 17 p. - (State Standard of Ukraine).
5. Trembovlya V. I. Thermal testing of boiler plants / V. I. Trembovlya, E. D. Finger, A.A.Avdeeva . – M. : Energy, 1977. – 296 p.
6. Pat . 26159 IPC F23N 3/00 Method of regulation of some or all of the factors that influence fuel combustion grate grid / Martin Johannes, Joseph Edmund, Joachim Horn , Franz Rampp . - Publish. 6.7.99 .
7. Directory of RIELLO Alphabet burning [Electronic resource] Access <http://rielo.ru/azbuka>.
8. Yuzjuk A.O. Indicators boiler in full burn solid fuel after a single load / A.O.Yuzjuk, Habinets B.V / Energy and Electrification . – 2012. – № 8. –С.3 –6.
9. Operating Instructions flue gas analyzers testo 327 [Electronic resource] Access <http://www.energo-snab.ru/upload/iblock/7ee/7ee065dbc64262b4bbec7b18fa96f736.pdf>
10. Manual and installation of solid fuel boiler LOGICA , steel [Electronic resource] Access www.tetan.ua.

АНАЛИЗ СРАВНЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ТВЕРДОТОПЛИВНЫХ КОТЛОВ

Аннотация: в статье проанализированы различные методы определения энергоэффективности твердотопливных водогрейных котлов малой мощности .

Ключевые слова: коэффициент полезного действия котла , твердое топливо , котлы малой мощности , потери теплоты , обратный баланс , доступный контроль.

ANALISIS COMPARING DIFFERENT MIRTHODS OF DETERMINING ENERGY EFFICIENCY BOILERS WORKS ON SOLID FUEL

Summari: this article analyzes the various methods for determining the efficiency of solid fuel boilers of low power.

Keywords : efficiency boiler , solid fuel boilers, low power, heat loss , reverse the balance, available control.