УДК 621.18

Боднар Л. А.
Степанов Д. В.

АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНИХ РІШЕНЬ ДЛЯ АДАПТАЦІЇ ТВЕРДОПАЛИВНИХ КОТЛІВ ДО СТАНДАРТІВ ЕКОДИЗАЙНУ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У роботі систематизовано сучасні тенденції розвитку технологій проєктування котлів на твердому паливі в умовах жорсткіших нормативних вимог до енергоощадності та екологічної безпеки. Проаналізовано положення технічних регламентів з екодизайну, гармонізованих із директивами Європейського Союзу, в частині встановлення порогів сезонної енергоефективності та граничних концентрацій викидів забруднювальних речовин. Особливу увагу приділено чинникам, що визначають сезонну ефективність котельного обладнання в реальній експлуатації, зокрема впливу власних витрат електроенергії допоміжними агрегатами та системами автоматики. Наведено приклади розрахунку сезонної енергоефективності пелетних котлів і проведено оцінку їхньої відповідності європейським нормативам екодизайну. Узагальнено результати впровадження турбулізаторів різних конфігурацій, комбінованих інтенсифікаторів, економайзерів та утилізаторів теплоти димових газів. Показано, як геометрія теплообмінних поверхонь впливає на температуру відхідних газів і коефіцієнт корисної дії агрегатів. Також проаналізовано інженерні рішення для мінімізації емісії твердих частинок, монооксиду вуглецю, летких органічних сполук та оксидів азоту. Розглянуто ефективність двостадійного спалювання, керамічного футерування топок, акумулюючих баків, систем регулювання співвідношення «паливо – повітря», а також електростатичних і тканинних фільтрів. Визначено вплив вологості палива, надлишку повітря та роботи на часткових навантаженнях на повноту згоряння й екологічні показники. Доведено необхідність комплексної модернізації котлів, що об'єднує оптимізацію горіння, теплообміну, автоматизації та газоочищення.

Ключові слова: водогрійний котел, технічний регламент, екодизайн, турбулізатор**,** коефіцієнт корисної дії, температура відхідних газів, сезонна енергоефективність обігріву приміщень, інтенсифікація теплообміну

Abstract

This work systematizes current trends in the development of solid-fuel boiler design technologies, driven by increasingly stringent regulatory requirements for energy efficiency and environmental safety. It analyzes the provisions of technical regulations on ecodesign – harmonized with European Union directives – regarding thresholds for seasonal energy efficiency and emission limits for pollutants. Particular attention is paid to factors determining the seasonal efficiency of boiler equipment under actual operating conditions, specifically the impact of internal electricity consumption by auxiliary units and automation systems. Examples of calculating the seasonal energy efficiency of pellet boilers are provided, along with an assessment of their compliance with European ecodesign standards. The results of implementing various configurations of turbulators, combined heat-transfer intensifiers, economizers, and flue-gas heat recovery systems are summarized. The study demonstrates how the geometry of heat-exchange surfaces influences flue-gas temperatures and the overall efficiency of the units. Furthermore, engineering solutions aimed at minimizing emissions of particulate matter, carbon monoxide, volatile organic compounds, and nitrogen oxides are analyzed. The effectiveness of two-stage combustion, ceramic furnace linings, thermal storage tanks, fuel-to-air ratio control systems, as well as electrostatic and fabric filters, is also examined. The influence of fuel moisture content, excess air, and partial-load operation on combustion completeness and environmental performance has been determined. The necessity for a comprehensive modernization of boilers – integrating the optimization of combustion, heat exchange, automation, and flue gas cleaning – has been established.

Keywords: heating boiler, technical regulation, ecodesign, turbulator, efficiency, flue gas temperature, seasonal space heating energy efficiency, heat transfer intensification

Вступ

Сучасна теплоенергетика розвивається під тиском вимог щодо декарбонізації та захисту довкілля. У межах євроінтеграції Україна гармонізувала законодавство з Регламентом ЄС № 2015/1189 (Постанова КМУ № 1184, наказ Міненерго № 705), запровадивши обов’язкові стандарти екодизайну (Ecodesign)**.** Ця концепція передбачає інтеграцію жорстких вимог до сезонної енергоефективності та граничних викидів забруднювачів безпосередньо на етапі проєктування обладнання, що фактично закрило ринок для застарілих низькоефективних котлів [1-3]. Реалізація вимог Регламенту змушує

відмовитися від застарілого екстенсивного проєктування котельної техніки. Перед розробниками постає комплексна проблема пошуку інженерного компромісу між енергоощадністю, чистотою викидів та економічною виправданістю конструкції.

Мета роботи – узагальнити сучасні технологічні підходи до інтенсифікації теплообміну та скорочення викидів у котельному обладнанні для забезпечення його відповідності регламентам екодизайну.

Основна частина

Традиційне зазначення номінального ККД за стабільної зовнішньої температури не відображає реальної роботи котла, який більшу частину часу функціонує на 30–50 % потужності, перебуває в режимі очікування та витрачає електрику на автоматику й регулятори. Через це європейські директиви (ErP) та національні Технічні регламенти ввели інтегральний показник – сезонну енергоефективність обігріву приміщень η_s**.** Вона визначається як відсоткове відношення теплової енергії, виробленої за опалювальний сезон, до загального річного споживання енергоресурсів котлом. Згідно з чинними нормами, мінімальне значення η_s становить 75 % для агрегатів потужністю до 20 кВт і 77 % – для установок понад 20 кВт. Методика розрахунку передбачає застосування знижувальних поправок до базового ККД за додаткові експлуатаційні енерговитрати.

Проаналізовано сезонну енергоефективність для двох котлів. Показано, що навіть за ідеально спроєктованої топки й теплообмінника котел не пройде сертифікацію екодизайну, якщо в режимі очікування чи зниженого навантаження він надмірно споживає електроенергію – зокрема через відсутність частотного регулювання приводів вентиляторів і димососів.

Проаналізовано методи інтенсифікації теплообмінув котлах та їхню ефективність [4-9].

Запровадження в Україні Технічного регламенту № 1375, адаптованого до європейських стандартів, докорінно змінило підхід до екологічного контролю твердопаливних котлів потужністю до 500 кВт. Поряд із показниками ККД органи ринкового нагляду тепер оцінюють емісію чотирьох критичних забруднювачів: твердих частинок (PM / пилу) як головного джерела смогу, органічних газоподібних сполук (OGC / ЛОС) – залишків незгорілих вуглеводнів, чадного газу (CO), що свідчить про хімічний недопал, а також високотемпературних оксидів азоту (NO_x).

В роботі проаналізовано методи зменшення викидів шкідливих речовин [10 -14].

Ефективним способом інтенсифікації горіння та одночасного пригнічення викидів NO_x) є двостадійне (ступеневе) спалювання. Під колосникову решітку подається первинне повітря (до 70 % від стехіометричного об'єму [13]), що створює в паливному шарі низькотемпературне відновне середовище й блокує утворення паливних та термічних оксидів азоту. Подача вторинного повітря в надшаровий простір забезпечує допалювання CO до CO_2 з додатковим тепловиділенням. За даними дослідження [13], у сучасних автоматичних котлах із двостадійним спалюванням при коефіцієнті надлишку повітря α = 1,3…2,9 концентрація CO не перевищує 20 – 50 мг/м³**,** що значно нижче за ліміти Ecodesign. Крім того, організація зони відновлення з α = 0,7 та часом перебування газів τ = 0,3…0,5 с скорочує емісію NO_x на 50 % для низькоазотистих і на 75 % – для високоазотистих палив.

Для зменшення викидів оксидів азоту сучасні виробники твердопаливних котлів на біомасі [15] застосовують також рециркуляцію димових газів.

Проаналізовано методи зменшення викидів твердих частинок в котлах на біомасі потужністю до 500 кВт [16 – 20].

Правила екодизайну зобов'язують приводити виміряні концентрації викидів CO, NOx, OGC, PM) до тиску 1013 мбар та базового вмісту кисню 10 %, щоб виключити заниження показників через розбавлення димових газів повітрям. Наприклад, зафіксована приладом концентрація CO = 445 мг/м³ за фактичного O_2 = 12% після приведення до стандартних 10 % зростає до 543,9 мг/м³, що вже виходить за межі допустимого нормативу (500 мг/м³) для автоматичних котлів.

ВИСНОВКИ

Узагальнення вимог екодизайну свідчить про необхідність зміни підходів до створення твердопаливних котлів із ручним та автоматичним завантаженням палива: поряд із номінальним ККД критичного значення набувають сезонна ефективність на неповних навантаженнях, власне електроспоживання агрегатів та обсяги шкідливих викидів. Встановлено, що застосування різних конструкцій інтенсифікаторів теплообміну в топці й конвективному газоході дозволяє підняти ККД на 7,4–11 %, тоді як для діючого котельного парку раціональним способом модернізації є монтаж економайзерів та утилізаторів теплоти.

На основі порівняння двох біомасових установок доведено, що виконання стандартів сезонної енергоефективності напряму залежить від ощадного споживання електрики допоміжними вузлами, впровадження частотного регулювання приводів вентиляторів, димососів і систем паливоподачі, а

також оптимізації алгоритмів автоматики. Оскільки зниження теплового навантаження суттєво погіршує екологічні характеристики горіння, котли з ручною подачею палива необхідно комплектувати буферними ємностями. Стабілізувати процес спалювання дають змогу технології двостадійного горіння з роздільною подачею повітря, рециркуляція димових газів, керамічне футерування топки та лямбда-регулювання за концентрацією кисню. Водночас зменшення викидів пилу ефективно досягається гравітаційним осадженням золи й використанням турбулізаторів, пилоуловлювачів, а встановлення дорогих електростатичних чи тканинних фільтрів на котлах малої потужності потребує попереднього техніко-економічного обґрунтування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

[1] Про затвердження Технічного регламенту щодо вимог до екодизайну для твердопаливних котлів: Постанова Кабінету Міністрів України від 23.12.2021 р. № 1375. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1375-2021-%D0%BF#Text (дата звернення: 22.10.2026).

[2] Про затвердження Технічного регламенту енергетичного маркування твердопаливних котлів: Наказ Міністерства енергетики України від 02.11.2020 р. № 705. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0016-21#n443 (дата звернення: 22.10.2026).

[3] COMMISSION REGULATION (EU) 2015/1189 of 28 April 2015 implementing Directive 2009/125/EC of the European Parliament and of the Council with regard to ecodesign requirements for solid fuel boilers. Official Journal of the European Union, L 193, 100–114. URL: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32015R1189 (дата звернення: 22.10.2026).

[4] Боднар Л. А. Раціональні методи інтенсифікації теплообміну в газотрубних котлах [Текст] / Л. А. Боднар, І. В. Лепетан // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. – 2018. – № 2. – С. 152-157.

[5] Боднар Л. А. Підвищення енергоефективності водогрійних котлів за допомогою інтенсифікації теплообміну /Л. А. Боднар, І. Ю. Федич// Науково-технічний журнал "Сучасні технології матеріали і конструкції в будівництві".– 2019. – №1. С. 134 – 139.

[6] Боднар Л. А. Ефективність інтенсифікації теплообміну в теплогенераторі на щепі деревини / Л. А. Боднар //Всеукраїнський науково-технічний журнал. Техніка, енергетика, транспорт АПК – 2017. – №4. – С. 124 – 128.

[7] Hargassner (опалення пелетами, тріскою та дровами). URL: https://hargassner.com.ua/new/wp-content/uploads/2020/10/Hackgut-Prospekt-Ansicht-UKR.pdf (дата звернення: 22.10.2026).

[8] Hargassner Pellet Boilers 6 – 65 кВт. URL: https://www.hargassner.com/wp-content/uploads/2022/10/hargassner-brochure-pellet-boilers.pdf (дата звернення: 22.10.2026).

[9] JDturbulators. URL: https://www.jdturbulators.com/products/ (дата звернення: 22.10.2026).

[10] Grzegorz Pełka, Mateusz Wygoda, Wojciech Luboń, Przemysław Pachytel and other. Analysis of the efficiency of a batch boiler and emissions of harmful substances during combustion of various types of wood. Energies, 2021, 14(20). URL: https://www.mdpi.com/1996-1073/14/20/6783 (дата звернення: 22.10.2026).

[11] Norbert Érces, László Kajtár. Operational Testing of a Solid Fuel Boiler with Different Fuels. Energies **2021**, 14. URL: https://www.mdpi.com/1996-1073/14/10/2966 (дата звернення: 22.10.2026).

[12] Silvie Koval, Jiri Vytisk, Jana Ruzickova, Helena Raclavska, Hana Skrobankova. The Impact of Solid Fuel Residential Boilers Exchange on Particulate Matter Air Pollution Applied Sciences, 2021, 11(12)/ URL: https://doi.org/10.3390/app11125400 (https://www.mdpi.com/2076-3417/11/12/5400) (дата звернення: 22.10.2026).

[13] Nussbaumer T. Low emission biomass combustion in automated boilers for heat and power generation. *IEA Bioenergy Task 32 Report*. 2024. 84 p. URL: https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2024/09/Nussbaumer_IEA-Bioenergy-Task32-Emissions-Report_2024_08_20.pdf. (дата звернення: 22.10.2026).

[14] Котельні установки на деревному паливі потужністю від 150 до 1700 кВт. URL: https://www.viessmann.ua/content/dam/public-brands/ua/pdf/broshury/%D0%BE%D0%BF%D0%B0%D0%BB%D1%8E%D0%B2%D0%B0%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D1%96-%D1%81%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B5%D0%BC%D0%B8/Prospekt_Holzheizsysteme_UA.pdf/_jcr_content/renditions/original.media_file.download_attachment.file/Prospekt_Holzheizsysteme_UA.pdf (дата звернення: 22.10.2026).

[15] Vitoflex 300-RF Commercial Wood-fired Boiler : Technical specifications / Viessmann Manufacturing Company Inc. URL: https://www.viessmann.ca/en/products/biomass-boilers/vitoflex-300-rf.html (дата звернення: 12.11.2026).

[16] Котли на біомасі Binder. URL: https://herz.ua/product-category/alternatyvna-energetyka/kotly-na-biomasi/ (дата звернення 20.10.2026 р).

[17] Котли з автоподачею Ретра. URL: https://retra.org.ua/kotly-z-avtopodacheiu/ (дата звернення 20.10.2026 р).

[18] Володимир Крамар. Очищення димових газів і поводження з золою. URL: https://uabio.org/wp-content/uploads/2023/11/9.-Kramar-V.-G.-Ochyshhennya-dymovyh-gaziv-i-povodzhennya-z-zoloyu.pdf

[19] OekoSolve.URL:https://oekosolve.com/en/produkte/?gad_source=1&gad_campaignid=9833279025&gbraid=0AAAADs12JUdA2IQNyMYMFARXwLW3D1b5&gclid=CjwKCAiAzKvXBhBAEiwABLl9Aqx0WSLGdDQoQBQ4nbNx4HpgTScC370padjPNYL5ImoZeVzTIOfv5xoCGT0QAvD_BwE (дата звернення: 20.10.2026).

[20] Wood heating systems from 100 to 1250 kW. URL: https://www.hia-env.org/wp-content/uploads/2022/04/Viessman-KOB-Product-Information.pdf

Боднар Лілія Анатоліївна – к.т.н., доцент, доцент кафедри теплоенергетики, e-mail: Bodnar06@ukr.net

Степанов Дмитро Вікторович – к.т.н., доцент, завідувач кафедри теплоенергетики, e-mail: stepanovdv@ukr.net

Bodnar Lilia, Cand. Sc. (Eng), Assistant Professor of power engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: Bodnar06@ukr.net.

Stepanov Dmytro – Cand. Sc. (Eng), Assistant Professor of power engineering, Head of the Department of Thermal Power Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: stepanovdv@ukr.net