

ОСОБЛИВОСТІ РОЗРАХУНКУ ВОДОГРІЙНИХ КОТЛІВ СЕРЕДНЬОЇ ПОТУЖНОСТІ НА ТРІСЦІ ДЕРЕВИНИ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

В роботі проведено дослідження показників водогрійного котла потужністю 1800 кВт для спалювання тріски деревини. Проаналізовано літературну інформацію по методиках розрахунку водогрійних котлів середньої потужності на твердому біопаливі. Зазначено, що впровадження котлів на твердому біопаливі сприятиме заміщенню викопних видів палива, оновленню існуючого обладнання для спалювання рослинної твердої біомаси, розвитку виробництва нового обладнання та його вдосконалення. Показано, що в сучасній літературі вкрай обмаль інформації по методах розрахунку котлів середньої потужності на твердій біомасі, а наявна інформація не систематизована і не узагальнена. Показано, що в Нормативному методі теплового розрахунку котлоагрегатів відсутня інформація по особливостях розрахунку котлів на твердій біомасі, а саме: відсутні рекомендації по розрахунку теплообміну в топці котла, в теплообміннику з інтенсифікованим теплообміном для котлів на твердій біомасі. Досліджено вплив частки виносу золи, коефіцієнта надлишку повітря, вологості деревини, коефіцієнта A_{ash} на температуру димових газів на виході з котла і порівняно з даними експлуатації. Запропоновано особливості розрахунку водогрійного котла на трісці деревини. Порівняно розрахункові показники температури газів на виході з котла з даними експлуатації. Показано, що в літературі обмаль інформації по рекомендованим значенням теплової напруги дзеркала горіння для сучасних способів спалювання рослинної твердої біомаси. Вказано, що дослідження процесів спалювання твердої біомаси і розробка методик розрахунку, формування бази даних по необхідних для розрахунку коефіцієнтах є досить актуальним завданням.

Вказано, що на даному етапі досліджень методика розрахунку теплообміну в топці котла, наведену в нормативному методі теплового розрахунку котлоагрегатів варто використовувати для розрахунку водогрійних котлів середньої потужності. Незважаючи на спрощення, що закладені в математичну модель, результати розрахунків і даних експлуатації відрізняються не суттєво.

Ключові слова: тріска деревини, водогрійний котел, коефіцієнт корисної дії, температура відхідних газів, коефіцієнт теплової ефективності, інтенсифікація теплообміну.

Abstract

The paper studies the performance of a 1800 kW water heating boiler for burning wood chips. Literature information on methods for calculating medium-power water heating boilers using solid biofuels is analyzed. It is noted that the introduction of solid biofuel boilers will contribute to the replacement of fossil fuels, the renewal of technological parks of existing equipment, the development of the production of new equipment, and its installation and maintenance activities. It is shown that in modern literature there is very little information on methods for calculating medium-power boilers on solid biomass, and the available information is not systematized and not generalized. It is shown that in the Normative Method for Thermal Calculation of Boiler Units there is no information on the features of calculating boilers on solid biomass, namely: there are no recommendations for calculating heat exchange in the boiler furnace, in a heat exchanger with intensified heat exchange for boilers on solid biomass. . The influence of the ash removal fraction, excess air coefficient, wood moisture, and A_{sh} coefficient on the temperature of flue gases at the boiler outlet and compared with operating data were investigated. The features of calculating a wood chip water heating boiler were proposed. The calculated gas temperature indicators at the boiler outlet were compared with operating data. It was shown that there is little information in the literature on the recommended values of the thermal stress of the combustion mirror for modern methods of burning solid plant biomass. It was indicated that the study of solid biomass combustion processes and the development of calculation methods, the formation of a database on the coefficients required for calculation are quite relevant tasks.

It was indicated that at this stage of research, the method for calculating heat transfer in the boiler furnace, given in the normative method of thermal calculation of boiler units, should be used for calculating medium-power water heating boilers. Despite the simplifications incorporated in the mathematical model, the results of calculations and operating data do not differ significantly.

Keywords: wood chips, hot water boiler, efficiency, exhaust gas temperature, coefficient of thermal efficiency, heat transfer intensification.

Вступ

Заміщення викопних видів палив твердою біомасою є важливим завданням сьогодення. Наразі найбільш широко використовуються такі види твердої біомаси: тріска деревини, гранули (лушпиння соняшника, солома), брикети, солома в тюках, енергетичні культури, тощо. Як зазначено в роботі [1] широке впровадження об'єктів генерації на твердій біомасі сприяє залученню сучасних передових технічних рішень у сферу теплозабезпечення, оновленню технологічних парків існуючого обладнання, розвитку виробництва нового обладнання, діяльності з його монтажу та обслуговування. Залежно від виду біомаси, її складу, вологості, теплоти згорання, розміру частинок, насипної густини та зольності, властивості золи плавитись чи спікатись, використовують різні технології спалювання [2]. В зв'язку з цим, виникає завдання з розробки методик розрахунку котлів на твердій біомасі з різними технологіями спалювання. Як зазначено в роботі [3], темпи впровадження таких котлів випереджають науково-технічне забезпечення їх розробки. Автори [4] також зазначають, що розробка котлів на деревних гранулах часто ґрунтується на досвіді, отриманому емпіричним шляхом, тому розробка є тривалою і дороговартісною. У вітчизняній літературі вкрай обмаль інформації по експериментальних дослідженнях котлів малої та середньої потужності на твердій біомасі та рекомендацій стосовно їх проектування та розрахунку. В роботі [5] запропоновано в загальному вигляді модель розрахунку твердопаливного котла потужністю до 100 кВт, що заснована на нормативному методі розрахунку, але зазначено, що модель не апробована. Авторами [5] поставлено задачу виконати розрахунок за розробленою моделлю та порівняти з результатами випробувань котла. В роботі [6] визначено експериментальним шляхом розрахункові характеристики ретортних топків при роботі на різних видах деревного палива з різною вологістю і фракційним складом. Дослідження проводились для котлів потужністю 100 кВт. Отримані в даній роботі [6] дані є основою для конструювання промислових топкових пристроїв більшої потужності. В роботі [7] представлено спроектовану конструкцію котла на біомасі потужністю 600 кВт. Котел спроектовано для підігрівання термоолії для ORC-циклу. Конструкція топки створена на основі аналітичних розрахунків, а розміщення сопел для подавання повітря в котел виконано на основі CFD моделювання в програмному забезпеченні ANSYS. В роботі надано теоретичні рекомендації по раціональній конструкції котла: по виконанню колосникової решітки, по розміщенню сопел для подачі повітря, по шляхах організації двофазного руху газів в топці.

На основі експериментальних даних, нами запропоновано методику розрахунку газогенераторного водогрійного котла на деревині [8]. В роботі [9] авторами експериментально досліджено показники роботи повітряного теплогенератора потужністю 1500 кВт, що працює на соломі, а також запропоновано особливості розрахунку таких котлів.

Найважливішою в літературі інформацією по експериментальних дослідженнях показників котлів потребує систематизації та узагальнення.

Наразі в Україні для розрахунку парових і водогрійних котлів використовується Нормативний метод теплового розрахунку котлоагрегатів (НМ). Нормативний метод розроблено для конструкторів, інженерно-технічного персоналу ТЕС та котельень і в 3-й редакції опубліковано в 1998 році. З того часу з'явилося багато різноманітних конструкцій котлів на твердій біомасі, для яких відсутні методики розрахунку. Як показали дослідження, застосування НМ для розрахунку котлів малої і середньої потужності, особливо на твердій біомасі, без певної адаптації і корекції неможливо.

Метою даної роботи є аналіз методів розрахунку водогрійних котлів середньої потужності на твердому біопаливі, дослідження показників роботи водогрійного котла потужністю 1800 кВт на трісці деревини, порівняння результатів з даними експлуатації котла, розробка рекомендацій по розрахунку.

Основна частина

Водогрійний котел встановлений на одному з підприємств м. Вінниця. В якості палива використовується тріска деревини. Температурний режим котла 90/70 °С. Потужність котла становить 1800 кВт.

Згідно даних експлуатації котла, температура газів на виході з котла коливається в межах 210...220 °С. На основі розробленої нами математичної моделі проведено числові розрахунки водогрійного котла. Отримані результати порівняно з даними експлуатації. Оскільки під час опалювального періоду вологість тріски деревини може змінюватись, то оцінено роботу котла на паливі з вологістю 20 та 40 %. Розміри топки та теплообмінника взято згідно замірів.

Розрахунок теплообміну в топці виконано згідно НМ, але з певними спрощеннями. Для розрахунку коефіцієнта поглинання променів частинками золи, $1/(m \cdot MPa)$

$$k_{ash} \cdot \mu_{ash} = \frac{10^4 \cdot A_{ash}}{\sqrt[3]{(T_t'')^2}} \frac{\mu_{ash}}{1 + 1,2 \cdot \mu_{ash} \cdot s}, \quad (1)$$

необхідний коефіцієнт A_{ash} , табличне значення якого становить від 0,6 для торфу до 1 для антрацитового штибу. Але значення цього коефіцієнта для твердої біомаси в літературі не наводиться. Для розрахунків взято $A_{ash}=0,6$ як для торфу. На рисунку 2 оцінено вплив коефіцієнта A_{ash} на розрахункову температуру відхідних газів та порівняно отримані результати з даними експлуатації. Взято такі значення A_{ash} : 0,6 (торф), 0,75 (сланці, буре вугілля), 0,8 (кам'яне вугілля), 1 (антрацитовий штиб). Коефіцієнт надлишку повітря в топці взято 1,4.

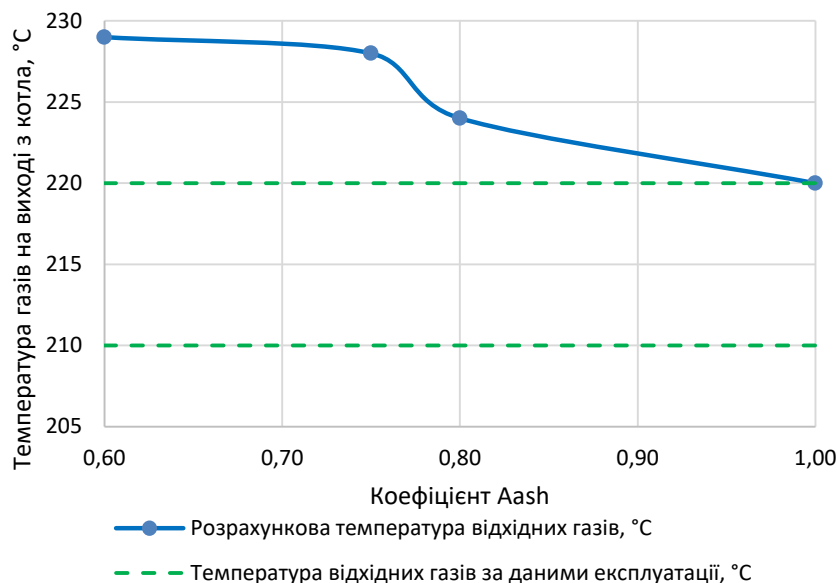


Рис. 2. Вплив коефіцієнта A_{ash} на значення температури відхідних газів

Як показали дослідження, найбільші відхилення розрахункових даних і експлуатаційних становлять 3,9...8,3 %. Отримані результати свідчать про незначний вплив коефіцієнта $A_{ал}$ на температуру газів. Слід зазначити, що тріска деревини має низьку зольність (0,6 %), в той час як лушпиння соняшника 2,4%, солома 4,5%, лушпиння рису 19,5%. Тому дослідження процесів спалювання твердої біомаси і розробка методик розрахунку, формування бази даних по необхідних для розрахунку коефіцієнтах є досить актуальним завданням.

Слід також зазначити, що в котлі реалізоване двостадійне спалювання палива, коли вся необхідна для горіння кількість повітря розділена на два потоки: перший потік надходить під колосникову решітку, другий подається через отвори в стінках топки. В літературі чимало досліджень про позитивний вплив двостадійного спалювання на екологічні показники котлів. В роботі [10] вказано, що вторинне повітря посилює змішування димових газів з киснем, що сприяє спалюванню горючих газів. Автори зазначають [4], що за допомогою ефективної стратегії розподілення повітря в топці можна знизити викиди твердих частинок майже в 5 разів. Такий ефект пояснюють тим, що за рахунок малого коефіцієнта надлишку первинного повітря відбувається низька швидкість перетворення калію в леткі речовини. Разом з тим нами не знайдено рекомендацій по розрахунку теплообміну в топці при двостадійному горінні палива. Тому розрахунок проводився по загальному коефіцієнту надлишку повітря.

Для розрахунку коефіцієнта теплової ефективності екранів ψ , необхідне значення коефіцієнта ζ , що враховує зниження теплосприйняття екрану при його забрудненні чи закритті його поверхні ізоляцією. Значення ζ залежить від типу екрана і виду палива і наводиться в таблиці 4.2 [10]. Його значення коливається від 0,1 до 0,65. В розрахунках прийнято $\zeta=0,6$ як для настінних гладкотрубних екранів в шарових топках. Слід зазначити, що табличних значень цього коефіцієнта для твердої біомаси немає.

Досліджено також вплив частки винесення золи $a_{вин}$ на температуру відхідних газів (рис. 3). Частка виносу золи впливає на концентрацію золи в продуктах згорання і на коефіцієнт поглинання

променів частинками золи $a_{\text{вин}}$. Тобто має вплив на випромінювальну здатність полум'я. Значення частки винесення золи в нормативному методі наводиться для камерних ($a_{\text{вин}} = 0,65 \dots 0,9$) і шарових топків ($a_{\text{вин}} = 0,1 \dots 0,5$). Значення коефіцієнта залежить від продуктивності котла, способу шлаковидалення, від типу палива, типу колосникової решітки (поворотні колосники, ланцюгова решітка прямого ходу, зворотного ходу). В сучасних водогрійних котлах середньої потужності на твердій біомасі використовують такі способи спалювання в шарі: на нерухомій решітці, на перештовхувальній решітці, на обертальній решітці, на рухомій решітці, на вібраційній решітці. Такий новий вид палива як пелети спалюють в ретортах, за допомогою стокерних пальників. Для вказаних способів спалювання твердої біомаси немає рекомендованих значень частки винесення золи. Крім того, топки сучасних котлів часто виконують двоходовими шляхом встановлення перегородки. Це також впливає на винесення золи з топки.

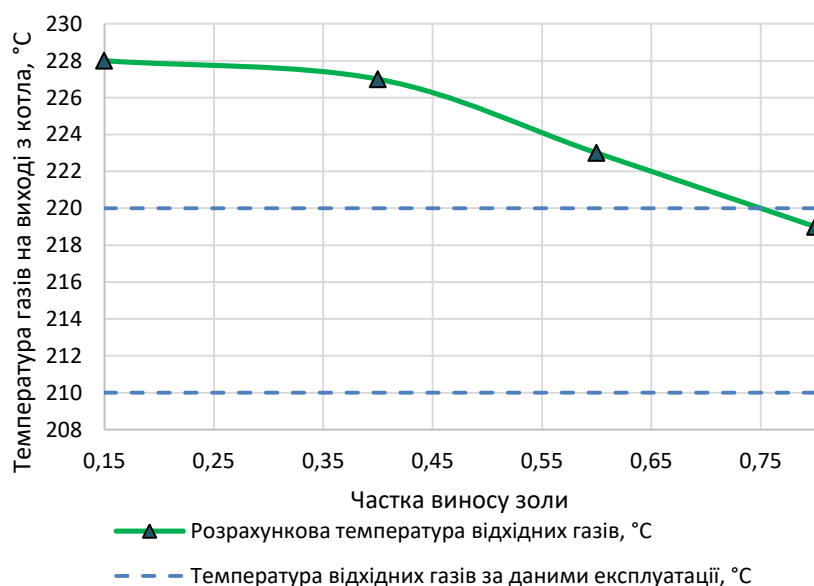


Рис.3. Дослідження частки винесення золи на температуру відхідних газів

Для розрахунків взято $a_{\text{вин}} = 0,15 \dots 0,8$. Як показують результати досліджень, при частці $a_{\text{вин}} = 0,15$, розходження між розрахунковою температурою газів і даними експлуатації становить 3,5...7,8 %.

Під час опалювального періоду вологість тріски деревини може коливатись. В роботі [13] проаналізовано вплив вологості деревної тріски на процес горіння, на утворення викидів CO , NO_x та ККД котла. Протягом досліджуваного періоду (15 діб) вологість тріски коливалась від 34 до 44 %. При цьому авторами [13] досліджено, що при зниженні вологості на 4%, ККД котла зменшується на 1%, що пов'язано зі збільшенням CO в димових газах з 60 мг/м^3 до 105 мг/м^3 , а отже втратами теплоти з хімічним недопалюванням. В роботі досліджено параметри роботи котла на трісці деревини робочою вологістю 20 та 40%. При цьому втрати теплоти з хімічною неповнотою згорання взято для всього досліджуваного діапазону значень вологості деревини і коефіцієнта надлишку повітря 1,5 %. На рисунку 4 наведено результати розрахунків температури газів на виході з котла при роботі на трісці деревини вологістю $W^p = 20 \%$ і $W^p = 40 \%$. Коефіцієнт теплової ефективності поверхні взято $\phi = 0,8$ та $0,9$. Для розрахунку інтенсифікованого теплообміну в теплообміннику котла використано рекомендації наведені в монографії [3] та [11-12]. Отримані результати порівняно з даними експлуатації котла. Як видно з рис.4, для всього діапазону зміни коефіцієнта надлишку повітря, температура газів досить близька до $210 \dots 220 \text{ }^\circ\text{C}$ (дані експлуатації котла). Для коефіцієнта надлишку повітря 1,3, вологості тріски 20 і 40 %, та $\phi = 0,8$ розрахункова температура становить $218 \dots 222 \text{ }^\circ\text{C}$. В цілому, відхилення від верхньої межі температури за даними експлуатації (для $W^p = 20 \%$, $W^p = 40 \%$, $\phi = 0,8$) становлять 0,9...5,8 %, та 5,7...10,06 % від нижньої.

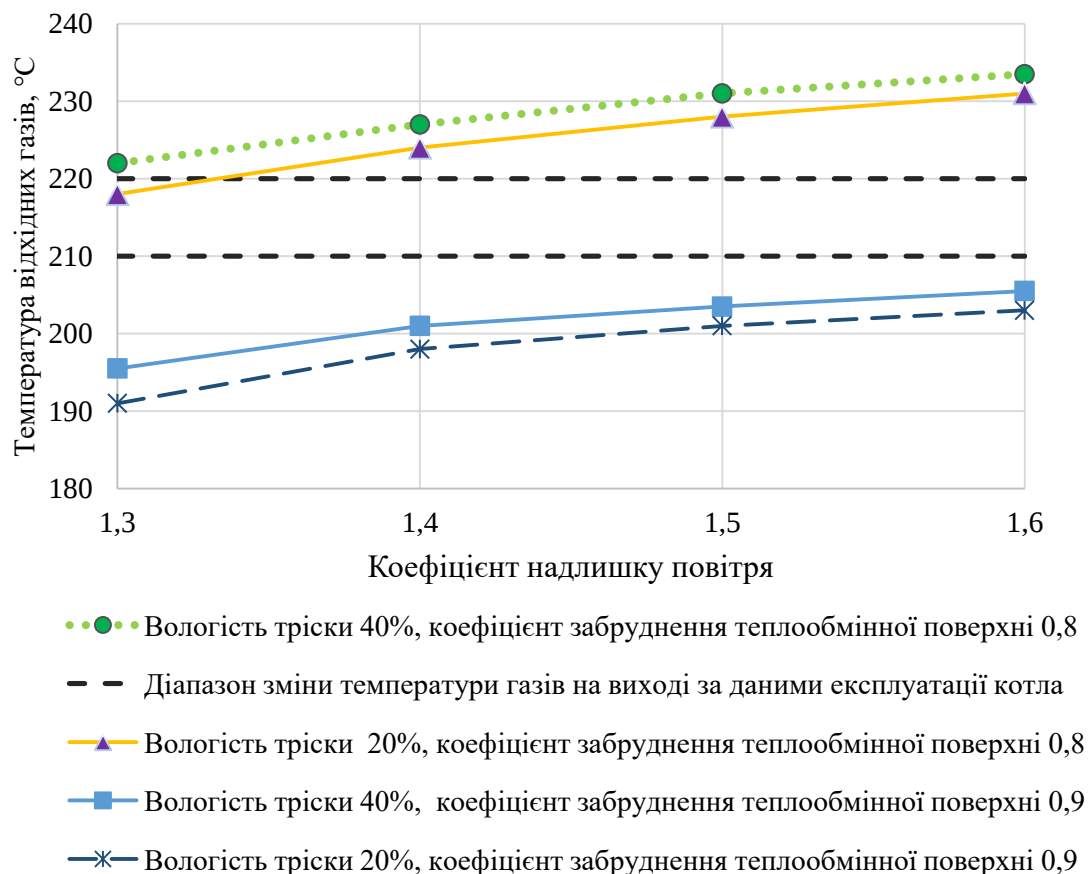


Рис.4. Дослідження впливу коефіцієнта надлишку повітря на температуру відхідних газів залежно від вологості тріски деревини та коефіцієнта теплової ефективності теплообмінної поверхні

Для теплообмінної поверхні з $\phi = 0,9$, розрахункова температура знаходиться в межах від 191 до 205 °C залежно від вологості палива. Відхилення від експлуатаційних даних становить 2,1...13,2%. Слід зазначити, що в котлах з горизонтальним розташуванням теплообмінника, проблема забруднення твердими частинками особливо актуальна. Сучасні виробники для очищення поверхні встановлюють системи пневмоочищення. В конструкції котла, що досліджується, автоматичних засобів очищення від золотого забруднення немає.

Отже, як показали результати досліджень, методику розрахунку теплообміну в топці котла, наведену в НМ варто використовувати для розрахунку водогрійних котлів середньої потужності. Незважаючи на зазначені вище спрощення, що закладені в математичну модель, результати розрахунків і даних експлуатації відрізняються не суттєво.

ВИСНОВКИ

Огляд літературної інформації показав, що наразі в Україні відсутня єдина нормативно-розрахункова база для інженерного розрахунку для всіх видів котлів (водогрійних, парових) на твердій біомасі. Похибки при проектуванні і конструюванні котлів можуть призвести до неефективної роботи котла, завищених показників викидів шкідливих речовин, а також до аварійних ситуацій. Тому експериментальні дослідження показників роботи котлів на різних видах твердої біомаси, що реалізують різні технології спалювання є актуальними і необхідними. Це дозволить сформувати базу даних та рекомендації необхідні для проектування.

В роботі досліджено вплив ряду факторів, рекомендації щодо вибору яких не наведено в нормативних та інших джерелах, проте вони впливають на розрахункові показники ефективності роботи котла. Виявлено, що зміна коефіцієнту A_{ash} для розрахунку випромінювання газів в діапазоні 0,6...1,0 призводить до зміни розрахункової температури відхідних газів на 3,6%. Зміна частки виносу золи в межах 0,15...0,8 призводить до зміни температури відхідних газів на 4,1%. При зміні коефіцієнта надлишку повітря від 1,3 до 1,6 зміна розрахункової температури відхідних газів складає до 6,7%. Суттєвий вплив на температуру газів на виході з котла має коефіцієнт теплової ефективності

теплообмінної поверхні трубного пучка ϕ . Для коефіцієнта $\phi = 0,8$ розрахункова температура газів становить 218...222 °С, тобто відхилення від експериментальних даних складають 0,9...10,1 %. Для теплообмінної поверхні з $\phi = 0,9$ розрахункова температура відхідних газів складає 191...205 °С, а відхилення від експериментальних даних – 2,1...13,2%.

Співставлення результатів моделювання та експериментальних досліджень дозволяє зробити висновок, що тепловий розрахунок водогрійних котлів середньої потужності на трісці деревини може бути виконаний з використанням Нормативного методу із врахуванням запропонованих рекомендацій.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Г. Г. Гелетуха, Ред., *Підготовка та впровадження проектів заміщення природного газу біомасою при виробництві теплової енергії в Україні. Практичний посібник*. Київ, Україна : Поліграф плюс, 2016. 104 с.
- [2] T. Nussbaumer, "Low emission biomass combustion in automated boilers for heat and power," IEA Bioenergy: Task 32. 46 pages. 2024. Режим доступу: https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2024/09/Nussbaumer_IEA-Bioenergy-Task32-Emissions-Report_2024_08_20.pdf
- [3] Д. В. Степанов, Л. А. Боднар, *Енергетична та екологічна ефективність водогрійних котлів малої потужності*. Монографія, Вінниця, Україна: ВНТУ, 2011. 151 с.
- [4] T. Zdravcevic, B. Rajh, F. Kokalj, "CFD modelling of air stages combustion in a wood pellet boiler using the coupled modelling approach", *Thermal Science and Engineering Progress*. Vol.20. December. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2020.100715>
- [5] А. П. Фалендиш, О. В. Клецька, Є. А. Бітюра, «Модель розрахунку твердопаливного котла невеликої потужності,» *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*, вип. 166, С. 185 – 190. 2016.
- [6] Г. Г. Гелетуха, «Науково-технічні засади виробництва енергії з біологічних видів палива.» дис. доктора техн. наук, Інститут технічної теплофізики НАН України, Київ, 2021 р.
- [7] K. Ronewicz, T. Turzynski, D. Kardas, "Design and distribution of air nozzles in the biomass boiler assembly," *Transactions of the institute of fluid-flow machinery*. №125. P. 13-28. 2013.
- [8] L.A. Bodnar, D. V. Stepanov, A. N. Dovgal, "Experimental investigations of the energy and environmental indices of operation of a low capacity combined gas producer and hot-water boiler," *Journal of engineering physics and thermophysics*. Volume 88, pages 962-967, August, 2015. <https://doi.org/10.1007/s10891-015-1271-x>.
- [9] Л. А. Боднар, Д. В. Степанов, Р. В. Сливко, «Експериментальні дослідження показників роботи теплогенератора потужністю 1500 кВт на соломі,» *Наукові праці Вінницького національного технічного університету* [Електронний ресурс]. №1. 2017. Режим доступу: <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/497/494>
- [10] М.М. Чепурний, Д.В. Степанов, Є.С. Корженко, *Теплові розрахунки парогенераторів*. Вінниця, Україна: ВНТУ, 2005. 155 с.
- [11] Л. А. Боднар, «Раціональні методи інтенсифікації теплообміну в газотрубних котлах,» *Науково-технічний збірник "Сучасні технології матеріалів і конструкцій в будівництві"*, №2, С.93 – 98. 2018.
- [12] Л. А. Боднар, «Ефективність інтенсифікації теплообміну в теплогенераторі на щепі деревини,» *Всеукраїнський науково-технічний журнал. Техніка, енергетика, транспорт АПК*, №4. С. 124 – 128. 2017.
- [13] M. Bosnjakovic, N. Veljic, C. Soldan, "Influence of moisture content in wood chips on the boiler operation," *7 th international conference Vallis Aurea: research&innovation*, Pozega-Slavonia, Croatia, 2020. P. 91-101. Режим доступу: <https://hrcak.srce.hr/omp/index.php/ftr/catalog/view/18/17/1132>

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