

Д. В. Степанов, к.т.н., доц., ВНТУ
С.Й. Ткаченко, д.т.н., проф., ВНТУ
Д. Я. Лисюк, студент

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ КОНДЕНСАЦІЙНОГО ЕКОНОМАЙЗЕРА НА ПРОМИСЛОВІЙ КОТЕЛЬНІ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У тезах розглянуто актуальну проблему підвищення енергоефективності та екологічності роботи промислових парових котелень, що працюють на біомасі, зокрема на лушпинні соняшника. Об'єктом дослідження обрано котельню Вінницького олійно-жирового комбінату, де встановлені парові котли, що працюють у режимі високих навантажень без резервування потужностей. За таких умов виникають значні теплові втрати при аварійних зупинках і недоотримання теплової енергії.

Запропоновано впровадження конденсаційного економайзера для утилізації теплоти відхідних газів котлів на біопаливі для підвищення енергетичної, екологічної та економічної ефективності. Виконано моделювання роботи контактного теплоутилізатора з активною насадкою типу БКТО фірми LATHERM. Як низькотемпературний теплоносіє використовується сира технічна вода.

Виявлена можливість утилізувати значну теплоту, що може бути використана на нагрів технічної води. Це забезпечить економію палива у вигляді лушпиння соняшника, зниження температури відхідних газів і поліпшення ефективності роботи хімоводоочищення. Додатково конденсаційний економайзер виконає функцію очищення димових газів від золи, що зменшує техногенне навантаження на довкілля.

Виконані економічні розрахунки, розраховані капіталовкладення та їх терміни окупності. Враховано також додаткові експлуатаційні витрати, пов'язані з очищенням теплообмінних поверхонь і циркуляцією теплоносія. Підтверджено, що впровадження конденсаційного економайзера є ефективним технічним рішенням для підвищення енергетичної, екологічної та економічної ефективності промислових котелень, що працюють на біомасі.

Ключові слова: біомаса, паровий котел, конденсаційний економайзер, рекуперація відхідного тепла, енергоефективність, екологічні показники, лушпиння соняшнику

Abstract

The article addresses the urgent issue of improving the energy efficiency and environmental performance of industrial steam boiler plants operating on biomass, particularly sunflower husk. The case study focuses on the boiler plant of the Vinnytsia Oil and Fat Plant, equipped with steam boilers of a total steam capacity of 40 t/h, operating under high loads without reserve capacity. Such conditions lead to significant thermal losses during emergency shutdowns and reduced heat supply reliability.

The purpose of this research is to assess the energy, environmental, and economic efficiency of installing a condensation-type economizer for waste heat recovery from biomass-fired boilers. A simulation of the contact heat recovery unit with an active packing (LATHERM BKTO model) was carried out. The flue gas temperature after the boilers is approximately 190 °C, and raw technical water with a flow rate of 8.9 kg/s is used as a low-temperature coolant.

Modeling results show that installing two BKTO-1.5 economizers enables the recovery of 640–655 kW of heat power, heating technical water to 28–35 °C. This ensures fuel savings (sunflower husk), a decrease in flue gas temperature, and improved performance of the water treatment system. The condensation economizer also provides wet cleaning of flue gases from ash, reducing the environmental impact of the boiler plant.

Economic analysis revealed that the annual fuel savings amount to 660–690 thousand UAH, while the equipment cost is about 1 million UAH, resulting in an acceptable payback period. Although additional operating costs are expected, such as cleaning and water filtration, the implementation of a condensation economizer significantly improves the energy, environmental, and economic efficiency of industrial biomass boiler systems.

Keywords: biomass, steam boiler, condensation economizer, waste heat recovery, energy efficiency, environmental performance, sunflower husk.

Вступ. Постановка задачі

Сучасна промислова теплоенергетика України перебуває на етапі активного пошуку шляхів підвищення енергоефективності та зменшення негативного впливу на довкілля. Зростання вартості енергоресурсів і посилення екологічних вимог зумовлюють необхідність удосконалення технологій спалювання палива та модернізації існуючих котельних систем [1-4].

На сьогодні значна частина промислових котелень в Україні, зокрема у харчовій промисловості, працює в умовах підвищених навантажень і часто не має резервних потужностей. Це знижує надійність теплопостачання та призводить до додаткових енергетичних і економічних втрат під час аварійних або вимушених зупинок обладнання.

Котельне господарство Вінницького олійно-жирового комбінату є показовим прикладом таких систем. Воно експлуатує твердопаливні парові котли, що працюють на лушпинні соняшника — відновлюваному біопаливі, утвореному як побічний продукт основного виробництва. Ефективніше використання цієї сировини дозволить не лише зменшити енерговитрати підприємства, а й підвищити частку товарної продукції з лушпиння у вигляді паливних гранул.

Температура димових газів після існуючих котлів становить 160...200 °С, що свідчить про значний потенціал утилізації теплоти. Одним із найбільш перспективних шляхів її використання є встановлення конденсаційних або неконденсаційних економайзерів, які дозволяють підвищити коефіцієнт корисної дії котельні без істотного втручання у конструкцію котлоагрегатів. За даними авторів [5-9], застосування конденсаційного економайзера може забезпечити зростання ефективності енергетичного використання палива більш ніж на 15 %.

Характерною особливістю таких систем є потреба у наявності низькотемпературного теплоносія, який забезпечує конденсацію водяної пари з димових газів [4-7]. Для умов промислової котельні цю функцію може виконувати сира технічна або хімічно очищена вода, що застосовується у виробничих процесах.

Таким чином, актуальним є дослідження можливостей впровадження конденсаційного газового економайзера в котельні Вінницького олійно-жирового комбінату з метою підвищення енергетичної, екологічної та економічної ефективності її роботи.

Мета роботи — оцінити енергетичну, екологічну та економічну ефективність встановлення конденсаційного газового економайзера на промисловій котельні на біомасі.

Результати досліджень

Для проведення оцінки ефективності впровадження конденсаційного економайзера як системи утилізації теплоти відхідних газів було обрано промислову котельню Вінницького олійно-жирового комбінату. Котельня обладнана паровими котлами сумарною паропродуктивністю 40 т/год, що працюють на біопаливі — лушпинні соняшника. Середня температура відхідних димових газів за котлами становить близько 190 °С, що свідчить про наявність значного потенціалу вторинного тепла.

Потужність економайзера з боку газів, з врахуванням частки газів $\eta_{об}$, що йде через економайзер

$$Q_{ек1} = G_z \cdot (I_{Г_1} - I_{Г_2}) \cdot B \cdot \eta_{об}.$$

Для моделювання процесів теплоутилізації застосовано контактний теплообмінник з активною насадкою типу БКТО, розроблений фірмою LATHERM [9]. Перед початком розрахунків виконано визначення основних характеристик продуктів згоряння біопалива, а також температурно-витратних параметрів системи охолодження.

Витрата води, що нагрівається

$$G_B = \frac{Q_{еe}}{c_B \rho_B (t_{B2} - t_{B1})}.$$

Розрахункова витрата сирої технічної води, яка використовується у технологічному циклі підприємства, становить 8,9 кг/с. Цей показник є граничним для реалізації конденсаційного режиму, оскільки саме наявність достатньої кількості холодного теплоносія забезпечує інтенсивну конденсацію.

сацію водяної пари з димових газів.

З метою мінімізації гідравлічних опорів і стабілізації роботи котлів прийнято, що через економайзери проходить близько 80 % загальної кількості димових газів після котлів. Моделювання теплотехнічних процесів показало [11-13], що орієнтовна утилізована теплова потужність конденсаційного економайзера становитиме 640–655 кВт. За таких умов температура технічної води на виході з теплообмінника підвищується до 28–35 °С, що забезпечує додаткове енергозбереження у системі водопідготовки та зменшує питомі витрати біопалива

$$\Delta B = \frac{Q_{\text{ек2}}}{Q_{\text{н}}^{\text{р}} \cdot \eta_{\text{к}}}$$

Використання конденсаційного економайзера забезпечує не лише зниження втрат теплоти з димовими газами, але й покращує екологічні показники роботи котельні. У процесі конденсації відбувається вологе осадження твердих частинок золи, що сприяє очищенню димових газів і зменшенню техногенного впливу на навколишнє середовище.

Економічна оцінка показала, що при вартості двох економайзерів БКТО-1,5 близько 1 млн грн, очікуваний річний економічний ефект від зниження витрат палива становить 660–690 тис. грн [14]. Це відповідає прийнятному терміну окупності проекту. Водночас необхідно враховувати додаткові експлуатаційні витрати, пов'язані з періодичним очищенням теплообмінних поверхонь, фільтрацією води в контурі активної насадки та витратами електроенергії на циркуляцію теплоносіїв.

Отримані результати підтверджують доцільність впровадження конденсаційного економайзера у промислових котельнях, що працюють на біомасі. Така технологія дозволяє одночасно підвищити енергетичну ефективність, екологічну безпечність та економічну результативність роботи котельного господарства без істотної реконструкції існуючого обладнання.

Висновки

Проведений аналіз підтверджує актуальність проблеми підвищення енергоефективності промислових котелень, що працюють на біомасі, зокрема на лущинні соняшника. Використання вторинних енергетичних ресурсів димових газів є одним із найефективніших шляхів зниження питомих витрат палива та підвищення загального коефіцієнта корисної дії котельних установок.

На основі проведеного моделювання встановлено, що впровадження конденсаційного економайзера типу БКТО-1,5 у котельні Вінницького олійно-жирового комбінату дозволяє утилізувати теплову потужність на рівні 640–655 кВт, що забезпечує підігрів технічної води до температури 28–35 °С. Це сприяє економії біопалива та покращує роботу системи водопідготовки підприємства.

Експлуатація конденсаційного економайзера сприяє також зниженню викидів твердих частинок у відхідних газах завдяки ефекту вологого осадження, що позитивно впливає на екологічні характеристики котельні та зменшує її техногенне навантаження на довкілля.

За результатами техніко-економічного аналізу встановлено, що річний економічний ефект від зниження витрат палива становить 660–690 тис. грн при вартості обладнання близько 1 млн грн, що відповідає прийнятному терміну окупності інвестицій. Незважаючи на наявність додаткових експлуатаційних витрат, проект характеризується високою економічною доцільністю.

Упровадження конденсаційного економайзера є ефективним технічним рішенням, яке забезпечує комплексне підвищення енергетичної, екологічної та економічної ефективності роботи промислової котельні. Отримані результати підтверджують можливість масштабного застосування подібних теплоутилізаційних систем у промислових об'єктах, що використовують біопаливо, з метою зниження енергоспоживання та підвищення екологічної безпеки виробництва.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Ткаченко С. Й., Чепурний М. М., Степанов Д. В. Розрахунки теплових схем і основи проектування джерел теплопостачання – Вінниця: ВНТУ, 2005. 137 с.
2. Шумський В. І., Сич В. В. Енергетична ефективність промислових котелень: аналітичний огляд сучасних технологій утилізації теплоти димових газів. Енергетика: економіка, технології, екологія. 2018. №3. С. 21–28.
3. Wang S., Li H. Energy recovery and emission reduction in biomass-fired boilers through flue gas condensation. Renewable Energy. 2021. Vol. 170. P. 1126–1138.
4. Zhao Y., Zhang L., Wu H. Experimental study on the performance of condensing heat exchangers in industrial biomass boiler systems. Applied Thermal Engineering. 2020. Vol. 180. P. 115–123.
5. Bujak J. Modeling and optimization of heat recovery from flue gas in biomass boilers. Energy Conversion and Management. 2015. Vol. 96. P. 450–459.
6. Сидоренко І. М., Ткачук В. О. Підвищення енергоефективності промислових котелень з використанням технологій вторинного тепловикористання. Технічна теплофізика і промислова енергетика. 2022. №2. С. 37–44.
7. European Commission. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Large Combustion Plants (LCP BREF). Brussels: Publications Office of the European Union, 2023.
8. Мазур В. Г., Руденко Ю. М. Підвищення ефективності котельних установок на біопаливі за рахунок використання конденсаційних теплообмінників. Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2019. №5. С. 45–52.
9. Твердопаливний конденсаційний економайзер Latherm. URL: <https://economizer.com.ua/ua/tverdopalyvnyi-kondensatsijni.html> (дата звернення: 10.11.2025)
10. Утилізатор тепла димових газів твердопаливний або газовий конденсаційний (промисловий економайзер) URL: <https://www.aspit.com.ua/services/ekonomajzery/tverdopalyvnyj-abo-gazovyj-kondensatsijnyj-teplotylyzator-ekonomajzer/> (дата звертання 10.11.2025 р.)
11. Белов С. В., Кузьменко О. О. Дослідження процесів тепломасообміну у конденсаційних економайзерах з різними типами насадок. Теплофізика і теплотехніка. 2020. Т. 42, №4. С. 15–22.
12. Теплообмін при конденсації пари з парогазової суміші. URL: https://web.posibnyky.vntu.edu.ua/fbteg/kulinchenko_teploper/12.htm (дата звернення 19.03.2025).
13. Шафаренко М. В., Воробйова О.В. Особливості конденсації пари з парогазової суміші. URL: <http://conf.biotech.kpi.ua/article/view/258857> (дата звернення 19.03.2025).
14. Ткаченко С.Й., Степанов Д. В., Лисюк Д. Я. Ефективність конденсаційного економайзера на промисловій котельні // Доповідь на Науково-технічній конференції факультету будівництва, цивільної та екологічної інженерії, Вінниця, 2024. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fbtegp/all-fbtegp-2025/paper/view/23776/19624> (дата звернення: 10.11.2025)

Степанов Дмитро Вікторович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри теплоенергетики, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Stepanovdv@ukr.net

Ткаченко Станіслав Йосипович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри теплоенергетики, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Stahit6937@gmail.com

Лисюк Денис Ярославович, студент кафедри теплоенергетики, Вінницький національний технічний університет

Stepanov Dmitro, candidate of technical Sciences, associate Professor, Department of power engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: Stepanovdv@ukr.net

Tkachenko Stanislav, d.t.s, Professor, Department of heat power engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: Stahit6937@gmail.com

Lysiuk Denis, student on Department of thermal power engineering, Vinnytsia National Technical University