



УДК 536.24:621.18

INFLUENCE OF OPERATING AND OPERATIONAL PARAMETERS ON THE FLUE GAS TEMPERATURE OF A 210 MW POWER UNIT

ВПЛИВ РЕЖИМНИХ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ПАРАМЕТРІВ НА ТЕМПЕРАТУРУ ВІДХІДНИХ ГАЗІВ ДЛЯ ЕНЕРГОБЛОКУ 210 MBT

DOI [https://doi.org/10.15589/smi2026.1\(22\).11](https://doi.org/10.15589/smi2026.1(22).11)

Tetiana V. Sheleshei
Шелешей Тетяна Вікторівна

Tetiana V. Sheleshei Шелешей Тетяна Вікторівна, канд. техн. наук
sheleshey_tanya@ukr.net ORCID:
0000-0002-7242-4107

Inna S. Bednarska Беднарська Інна Станіславівна, PhD
innabednarska1@gmail.com ORCID:
0000-0002-5558-4467

Kateryna O. Romanova Романова Катерина Олександрівна, канд. техн. наук
sheleshey_tanya@ukr.net
ORCID: 0000-0001-9738-3383

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ



Inna S. Bednarska
Беднарська Інна Станіславівна

Abstract. The object of this study is the technological process of a 210 MW power unit, specifically the exhaust gas removal system, which includes the boiler, chimney, gas ducts, an

The problem addressed in this study is the need to establish patterns of influence of operational and regime parameters on the exhaust gas temperature of power units to en.

The result of this research is the determination of functional dependencies (both linear and quadratic) between the operating modes of the power unit (electrical load during electricity generation and feedwater temperature) and the exhaust gas temperature. Additionally, an analysis of the impact of feedwater temperature and electrical power output on the flue gas temperature of the studied power unit has been conducted. It has been established that the exhaust gas temperature increases across the entire range of electrical power variation, while the influence of electrical power on exhaust gas temperature remains minimal.

A key feature of this study is that fuel consumption reduction and efficiency improvement are achieved through the rationalization of the power unit's operating modes. Unlike previous studies referenced in this work, where energy efficiency was attained by implementing heat exchangers, the proposed recommendations for operational parameter management allow achieving similar results without additional equipment costs. This is made possible by lowering the exhaust gas temperature, which in turn reduces heat losses with the exhaust gases (q_2), directly affecting the boiler's efficiency.

The obtained results of this study can be used for the development of operational mode charts for all power units of thermal power plants in Ukraine.

Key words: exhaust gas temperature; boiler efficiency; operational parameters; feedwater temperature; electrical power output.



Kateryna O. Romanova
Романова Катерина Олександрівна

Анотація. Об'єктом даного дослідження є технологічний процес роботи енергоблоку потужністю 210 МВт, зокрема система відведення відхідних газів, яка включає котел, димохід, газоходи та турбінні установки.

Проблема, що вирішувалася, полягає в тому, що є необхідність встановлення закономірностей впливу режимних і експлуатаційних параметрів на температуру відхідних газів енергоблоків, з метою підвищення ефективності енергоблоку.

Результатом даного дослідження є функціональні залежності (лінійна та квадратична) між режимами роботи енергоблоку (навантаженням під час виробництва електроенергії та температурою живильної води) і температурою відхідних газів. Також в результаті роботи виконано аналіз впливу температури живильної води та електричної потужності на температуру димових газів для енергоблоку, що розглядається. Встановлено, що температура відхідних газів зростає в усьому діапазоні зміни електричної потужності. Вплив електричної потужності на температуру відхідних газів є мінімальним.

Особливістю даної роботи є те, що зниження витрат палива та підвищення ККД є наслідком раціоналізації режимів роботи енергоблоку. На відміну від попередніх досліджень, які розглянуті в роботі, де енергоефективність досягається за рахунок впровадження теплообмінників, дані рекомендації щодо управління режимними параметрами дозволяють досягти аналогічних результатів без витрат на додаткове обладнання. Це стає можливим завдяки тому, що при зниженні температури відхідних газів зменшуються теплові втрати з відхідними газами (q_2), які мають безпосередній вплив на ККД котла.

Отримані результати цього дослідження можна використовувати при розробці режимних карт для всіх енергоблоків ТЕС України.

Ключові слова: температура відхідних газів; ефективність котла; режимні параметри; температура живильної води; електрична потужність.

References

- [1] Kabinet Ministriv Ukrainy. (2023). Pro skhvalennia Enerhetychnoi stratehii Ukrainy na period do 2050 roku [On approval of the Energy Strategy of Ukraine for the period up to 2050] (Rozporyadzhennia № 373-r id 21.11.2023). Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/373-2023-%D1%80#Text>
- [2] Sheleshey, T. V. (2018). Vzaemozv'язok temperatury vidkhidnykh haziv i tekhniko-ekonomichnykh ta ekolohichnykh pokaznykiv TETs [Relationship between flue gas temperature and techno-economic and environmental indicators of CHP]. Visnyk NTU "KhPI". Seriya: Enerhetychni ta teplotekhnichni protsesy i ustatkuvannia, 11(1287), 32–35.
- [3] Nyakuma, B. B., Mahyon, N. I., Chiong, M. S., et al. (2023). Recovery and utilisation of waste heat from flue/exhaust gases: A bibliometric analysis (2010–2022). Environmental Science and Pollution Research, 30, 90522–90546. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-28791-4>
- [4] Oyedepo, S. O., & Fakeye, A. B. (2020). Electric power conversion of exhaust waste heat recovery from gas turbine power plant using organic Rankine cycle. International Journal of Energy and Water Resources, 4, 139–150. <https://doi.org/10.1007/s42108-019-00055-3>
- [5] Auld, A., Berson, A., & Hogg, S. (2013). Organic Rankine cycles in waste heat recovery: A comparative study. International Journal of Low-Carbon Technologies, 8(Suppl 1), 9–18. <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctt033>.
- [6] Cao, Y., Gao, Y., Zheng, Y., & Dai, Y. (2016). Optimum design and thermodynamic analysis of a gas turbine and ORC combined cycle with recuperators. Energy Conversion and Management, 116, 32–41. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.02.073>
- [7] Carcasci, C., Ferraro, R., & Miliotti, E. (2014). Thermodynamic analysis of an organic Rankine cycle for waste heat recovery from gas turbines. Energy, 65, 91–100. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.11.080>
- [8] Mandi, R. P., & Yaragatti, U. R. (2012). Energy efficiency improvement of auxiliary power equipment in thermal power plant through operational optimization. In Proceedings of the Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES) (pp. 1–8). [https://doi.org/978-1-4673-4508-8/12/\\$31.00](https://doi.org/978-1-4673-4508-8/12/$31.00)
- [9] Sheleshey, T. V. (2019). Rozrobka tekhnichnykh rishen stosoovno ponyzhennia temperatury dymovykh haziv pry doslidzhenni vplyvu na nykh ekspluatatsiinykh i rehymnykh parametriv [Development of techni-

- cal solutions to reduce flue gas temperature when studying the influence of operational and regime parameters]. Vcheni zapysky TNU imeni V. I. Vernadskoho. Seriya: Tekhnichni nauky, 30(69, Ch. 2, № 2), 48–53.
- [10] Montgomery, D. C. (2012). Design and analysis of experiments (8th ed.). John Wiley & Sons.
- [11] Cochran, W. G., & Cox, G. M. (1957). Experimental designs. John Wiley & Sons.
- [12] Eveloy, V., Rodgers, P., Olufade, A., Wang, Y., & Alili, A. A. (2016). Waste heat recovery from gas turbine flue gases for power generation enhancement in a process plant. International Journal of Thermal and Environmental Engineering, 12(1), 53–60. <https://doi.org/10.5383/ijtee.12.01.007>
- [13] Lion, S., & Lion, S. (2017). A thermodynamic feasibility study of an organic Rankine cycle (ORC) for heavy-duty diesel engine waste heat recovery in off-highway applications. International Journal of Energy and Environmental Engineering. <https://doi.org/10.1007/s40095-017-0234-8>

Постановка задачі. Енергетичний сектор України відіграє ключову роль у забезпеченні населення та промисловості електричною й тепловою енергією, але значний знос основних фондів (до 70%) знижує надійність роботи та підвищує витрати палива на виробництво електроенергії.

Забезпечення ефективної та безпечної експлуатації енергетичного обладнання є одним із ключових завдань сучасної енергетики. Особливе значення має дослідження режимних та експлуатаційних параметрів роботи енергетичного обладнання, адже вони безпосередньо впливають на енергетичну ефективність, економічність та екологічну безпеку процесів виробництва теплової й електричної енергії.

Особливо актуальним є вирішення проблеми забезпечення надійної, економічної та екологічно безпечної роботи обладнання теплових електростанцій (ТЕС), яке морально і фізично застаріло, потребує модернізації, реконструкції або заміни. Тому першочерговим завданням є пошук шляхів підвищення теплової ефективності діючих ТЕС через оптимізацію процесів спалювання газу, зменшення теплових втрат у доквіллі шляхом зниження коефіцієнта надлишку повітря та температури відхідних газів. Ці завдання узгоджуються з цілями, визначеними в Енергетичній стратегії України до 2050 року [1].

Для енергоблоків потужністю 210 МВт, які є одними з найбільш поширених у великих енергетичних системах, важливо встановити чіткі закономірності між такими параметрами, як температура живильної води, потужність турбіни та температура

відхідних газів. Температура відхідних газів є важливим показником, який характеризує ефективність процесів горіння та передачі тепла, а також впливає на рівень шкідливих викидів у атмосферу.

Встановлення цих закономірностей дозволяє не лише оптимізувати режим роботи обладнання, але й мінімізувати енергетичні втрати, знизити витрати на паливо та експлуатацію, а також зменшити негативний вплив на навколишнє середовище. Актуальність такого дослідження особливо зростає в умовах підвищених вимог до енергоефективності та екологічної безпеки.

Дослідження залежності температури відхідних газів від режимних параметрів роботи блоку 210 МВт дозволить розробити науково обґрунтовані рекомендації для покращення його експлуатаційних характеристик, сприяючи підвищенню загальної продуктивності та надійності роботи енергетичних систем.

Дослідження щодо оптимального розподілу теплосприйняття між економайзером і повітропідігрівником, а також визначення температур живильної води та відхідних газів для ефективного горіння добре обґрунтовані для стаціонарних режимів роботи ТЕС. Однак у реальних умовах змінні режими роботи електростанцій ускладнюють підтримку оптимальних параметрів [2].

Таким чином, встановлення закономірностей режимних та експлуатаційних факторів на температуру відхідних зі збереженням довговічності газопровідних трактів котлів ТЕС потребує дослідження, які б забезпечували високоефективну роботу обладнання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сучасній енергетиці велика увага приділяється підвищенню ефективності роботи енергетичного обладнання, зокрема енергоблоків потужністю 210 МВт. Численні дослідження в галузі енергетики зосереджуються на вдосконаленні режимів роботи котлів і турбін, оптимізації теплових процесів і зменшенні викидів шкідливих речовин в атмосферу.

Основна частина досліджень в сфері енергоефективності блоків ТЕС свідчать, що одним із ключових факторів, який впливає на ефективність роботи котельного обладнання, є температура відхідних газів. Висока температура відхідних газів вказує на недосконалість процесу теплопередачі та значні енергетичні втрати. Це, своєю чергою, знижує ККД блоку та збільшує витрати палива. Крім того, невідповідність режимних параметрів, таких як температура живильної води чи потужність турбіни, може призводити до збільшення викидів шкідливих речовин, що суперечить сучасним екологічним стандартам.

У роботі [3] наведено, що співвідношення між температурою відхідних газів і живильної води в котлах ТЕС, що є ключовим фактором для підвищення енергоефективності. Наведені результати досліджень показали, що впровадження теплообмінників і систем рекуперації відпрацьованого тепла може значно знизити температуру димових газів, оптимізуючи температуру живильної води. Це, у свою чергу, сприяє підвищенню теплової ефективності та економії палива. Такий підхід особливо актуальний для вугільних електростанцій, де втрати тепла через високу температуру димових газів можна мінімізувати шляхом інтеграції економайзерів низького тиску та систем рекуперації тепла.

Однак залишаються невирішеними питання, пов'язані з визначенням закономірностей впливу експлуатаційних параметрів, зокрема електричної потужності, на температуру відхідних газів. Причиною цього можуть бути як об'єктивні труднощі, пов'язані зі складністю експериментальних досліджень на діючих енергоблоках, так і еко-

номічні аспекти, що ускладнюють впровадження додаткових систем теплоутилізації. Варіантом подолання цих труднощів може бути раціоналізація режимних параметрів без залучення додаткового обладнання.

Існує відома кореляція між температурою димових газів і електричною потужністю блоку електростанції [4, 5]. Температура димових газів, як правило, зростає зі збільшенням електричної потужності через підвищену інтенсивність згоряння палива для задоволення енергетичних потреб. У дослідженнях [6, 7] підкреслюється необхідність оптимізації ефективності згоряння шляхом регулювання співвідношення паливо-повітря, що безпосередньо впливає на температуру димових газів. Це регулювання є важливим для запобігання надмірним тепловим втратам, особливо при високих навантаженнях, одночасно забезпечуючи оптимальне використання палива та підтримку ефективності турбіни. Дослідження також використовують моделі для оптимізації контролю температури димових газів на основі зміни потужності. Оптимізація цих параметрів дозволяє зменшити теплові втрати з димовими газами, що підвищує ефективність роботи котла і турбіни, а отже, і електричну потужність [4].

В дослідженні [8], наводяться різні підходи до покращення енергоефективності, включаючи використання частотних перетворювачів, вдосконалені методи керування, та інтеграцію новітніх технологій для зменшення енергоспоживання допоміжного обладнання. Це дослідження враховує вплив змінного навантаження на роботу допоміжного обладнання та пропонує стратегії для підтримання ефективної роботи в умовах нестабільного енергоспоживання. Недоліком статті є те що в ній не розкривається комплексний підхід щодо вибору впливаючих факторів на температуру відхідних газів.

Саме такий підхід використаний у роботі [9], де досліджено вплив температури та витрати живильної води, електричної та теплової потужності на температуру відхідних газів. Встановлено, що температура відхідних газів зростає в усьому діапазоні зміни електричної потужності.

Відокремлення невіршених раніше частин загальної проблеми. Попередні наукові праці підкреслюють важливість встановлення залежностей між параметрами роботи обладнання, такими як температура живильної води, потужність турбіни та температура відхідних газів. Проте більшість досліджень мають узагальнений характер і не враховують особливості конкретних енергоблоків. Це створює труднощі для впровадження отриманих результатів у практику, зокрема для енергоблоків потужністю 210 МВт.

Все це дає підстави стверджувати, що доцільним є проведення подальших досліджень, присвячених розробці оптимальних режимних карт для підвищення ефективності роботи енергоблоків без значних капіталовкладень у модернізацію обладнання.

Мета та задачі дослідження. Метою дослідження є встановлення закономірностей впливу режимних і експлуатаційних параметрів на температуру відхідних газів енергоблоку потужністю 210 МВт. Це дасть можливість раціоналізувати роботу енергоблоку, підвищити енергетичну ефективність та зменшити викиди шкідливих речовин в атмосферу зі збереженням довговічності газовідвідних трактив котлів ТЕС великої потужності.

Для досягнення мети були поставлені наступні задачі дослідження:

- проаналізувати залежність температури відхідних газів від потужності турбіни;
- встановити регресійну залежність температури відхідних газів від експлуатаційних параметрів – дослідити залежність температури відхідних газів від температури живильної води
- розробити рекомендації для раціоналізації режимів роботи енергоблоку 210 МВт з метою зменшення температури відхідних газів, підвищення ККД та зниження витрат палива.

Методи, об'єкт та предмет дослідження. Об'єктом дослідження є технологічний процес роботи енергоблоку потужністю 210 МВт, зокрема система відведення відхідних газів, яка включає котел, димохід, газоходи та турбінні установки.

Гіпотеза полягає в тому, що існує кореляція між режимними та експлуатаційними

параметрами роботи енергоблоку та температурою відхідних газів. Зокрема, можна припустити, що:

1. Зміни в паливних параметрах (тип палива, вологість, теплоємність) можуть значно впливати на температуру відхідних газів.

2. Зміни в навантаженні блоку (потужність генератора) можуть призводити до зміни температури газів через зміну швидкості та температури спалювання.

3. Експлуатаційні параметри, такі як ефективність очищення газів та робота теплообмінних поверхонь котла, також мають вплив на кінцеву температуру відхідних газів.

Таким чином, дослідження спрямоване на встановлення закономірностей, які дозволяють зменшити температури відхідних газів, підвищити ефективність роботи енергоблоку та зменшити шкідливі викиди.

Експериментальні дослідження проводилися на Курахівській ТЕС, зокрема на енергоблоці №8 (блок з турбіною К-210-130-2 і котлом ТПП-109ТКЗ). Курахівська ТЕС є однією з провідних теплових електростанцій України, яка входить до складу ДТЕК і розташована в місті Курахове, Донецької області.

Для проведення експериментальних досліджень на енергоблоці №8 Курахівської ТЕС використовувались сучасні засоби вимірювальної техніки, що дозволяють отримувати точні та достовірні дані про параметри роботи обладнання. Використання цього комплексу вимірювальної техніки забезпечило детальний контроль параметрів процесів горіння та теплопередачі, що дозволило отримати точні дані для аналізу та оптимізації роботи енергоблоку.

Для аналізу результатів експериментів використовувалася методика статистичної обробки даних із застосуванням регресійного аналізу, який дозволяє оцінити взаємозв'язок між змінними та побудувати математичні моделі [10].

При використанні методу планування експерименту в досліді варіюються всі фактори, а самі досліді визначаються обраним планом. Видом рівняння регресії також задаються. Для характеристик теплоенергетичного обладнання підходить поліном другого ступеня [11]:

$$y = b_0 + \sum_1^k b_i x_i + \sum_1^k b_i x_i^2 + \sum_{i < j}^k b_{ij} x_i x_j, \quad (1)$$

де b_0, b_i, b_{ij} – оцінки коефіцієнтів рівняння регресії, в даному випадку полінома другого ступеня. Оцінку адекватності дає коефіцієнт множинної кореляції:

$$R = \sqrt{1 - \frac{\sum_1^n (\hat{y}_j - \bar{y}_j)^2}{\sum_1^n (y_j - \bar{y}_j)^2}}, \quad (2)$$

де y_j – поточне значення вихідної величини в J -му досліді; $\hat{y}_j$ – розрахункове значення вихідної величини за отриманим рівнянням

в J -му досліді $\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_1^k y_j$ – середнє значення вихідної величини в n дослідях.

Основний матеріал. Температура живильної води є важливою характеристикою, що впливає на температуру відхідних (вихідних) газів у котлоагрегатах теплових електростанцій. На рис. 1 наведено залежність (на основі добових відомостей режиму) температури відхідних газів від температури живильної води при значеннях електричної потужності для енергоблоку 210 МВт.

Наведений графік побудований по ключових точках, отриманих з добових журналів ведення режиму блоку №8 Курахівської ТЕС.

Наступним чинником впливу на температуру відхідних газів є електричне навантаження. Потрібно дослідити взаємозв'язок температури відхідних газів і електричної потужності. На рис. 2 наведено залежності температури відхідних газів від електричної потужності при значеннях температури живильної води для енергоблоку 210 МВт.

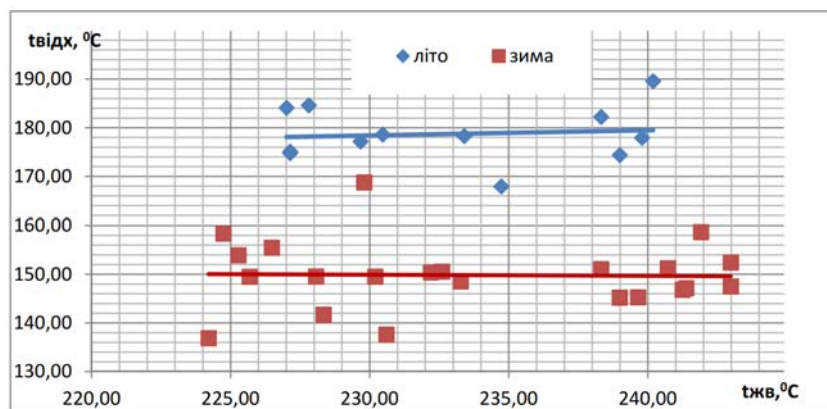


Рис. 1. Залежність температури відхідних газів від температури живильної води для значень електричної потужності в діапазоні $N_E = (170-190)$ МВт

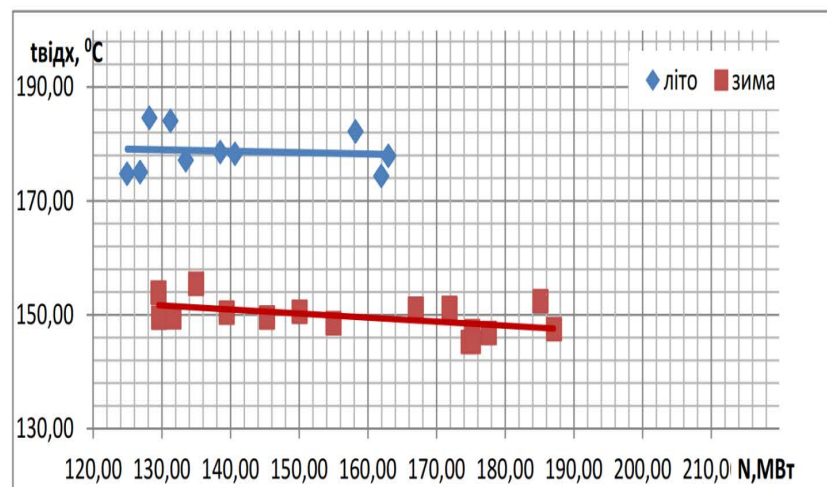


Рис. 2. Залежність температури відхідних газів від електричної потужності для значень температури живильної води за даними добових відомостей режиму для літнього та зимового періоду

За даними добових відомостей ведення режиму енергоблоку 210 МВт Курахівської ТЕС розроблена таблиця вхідних і вихідних змінних (табл. 1). Для даного дослідження вихідною величиною приймається температура відхідних газів, тобто $y = t_{\text{вих}}$. Змінними факторами є: температура живильної води $t_{\text{жв}}$, °C; електрична потужність блоку N_E , МВт.

В результаті проведених розрахунків в основу, яких покладені значення з таблиці 1 отримано залежності режимів роботи (навантажень при виробітку електроенергії та температури живильної води) та $t_{\text{вих}}$ для енергоблоку 210 МВт у вигляді рівнянь регресії:

– лінійна залежність:

$$\frac{t_{\text{вих}}}{t_{\text{вих}}^0} = -1,989 \frac{N_E}{N_E^0} + 5,908 \frac{t_{\text{жв}}}{t_{\text{жв}}^0} - 920,795, \quad (3)$$

– квадратична залежність:

$$\begin{aligned} \frac{t_{\text{вих}}}{t_{\text{вих}}^0} = & 48068,3 - 517,6 \frac{t_{\text{жв}}}{t_{\text{жв}}^0} + 158,9 \frac{N_E}{N_E^0} + 1,4 \left(\frac{t_{\text{жв}}}{t_{\text{жв}}^0} \right)^2 + \\ & + 0,1412 \left(\frac{N_E}{N_E^0} \right)^2 - 0,8717 \cdot \frac{t_{\text{жв}}}{t_{\text{жв}}^0} \cdot \frac{N_E}{N_E^0}. \end{aligned} \quad (4)$$

Для регресійної моделі (3) виконано перевірку статистичної значущості коефіцієнтів за t-критерієм Стюдента та адекватності моделі за критерієм Фішера. При кількості спостережень $n=38$ та числі факторів $k=2$ ступені свободи становлять $f=35$. Критичне значення t-критерію при рівні значущості $\alpha=0.05$ дорівнює $t_{\text{кр}}=2.03$.

Розраховані значення t-статистики становлять:

– для коефіцієнта при електричному навантаженні $t=3.57$,

– для коефіцієнта при температурі живильного повітря $t=11.24$.

Оскільки $t_i > t_{\text{кр}}$, відповідні коефіцієнти є статистично значущими.

Коефіцієнт детермінації моделі становить $R^2=0.863$. Розраховане значення критерію Фішера $F=110.1$ перевищує табличне $F_{\text{кр}}=3.27$, що підтверджує адекватність моделі експериментальним даним.

Рівняння (4) є багатофакторною регресійною моделлю другого порядку, що враховує лінійні, квадратичні та перехресні члени факторів. У моделі використано два основні фактори — відносну температуру вхідного середовища та відносне електричне навантаження енергоблоку, а загальна кількість параметрів моделі становить $k=5$.

Для підтвердження статистичної надійності отриманої залежності виконано оцінку значущості коефіцієнтів регресії за t-критерієм Стюдента. При кількості експериментальних спостережень $n=38$ ступені свободи становлять $f=32$. Критичне значення t-критерію при рівні значущості $\alpha=0.05$ дорівнює $t_{\text{кр}}(0.05;32) \approx 2.04$. Порівняння розрахованих значень t-статистики з критичним показало, що коефіцієнти моделі є статистично значущими, що свідчить про реальний вплив врахованих факторів та їх взаємодії на досліджуваний параметр. Адек-

Таблиця 1. Вхідні та вихідні змінні, що будуть використані для отримання залежностей у вигляді рівнянь регресії

Серпень				Січень			
Дата	N_E	$T_{\text{жв.в}}$	$T_{\text{вих}}$	Дата	N_E	$T_{\text{жв.в}}$	$T_{\text{вих}}$
02.08.2021	161.03	240.19	189.58	02.01.2022	139.43	232.20	150.39
03.08.2021	161.93	238.99	174.39	03.01.2022	175.19	241.38	147.15
04.08.2021	138.49	230.47	178.61	04.01.2022	135.38	229.80	168.76
05.08.2021	126.81	227.14	175.08	10.01.2022	134.30	224.74	158.38
07.08.2021	133.47	229.67	177.17	11.01.2022	175.29	239.65	145.28
15.08.2021	131.23	227.01	184.09	13.01.2022	140.42	230.60	137.62
16.08.2021	99.24	104.52	68.57	14.01.2022	174.66	238.99	145.23
17.08.2021	124.92	227.14	174.79	17.01.2022	134.98	226.48	155.47
18.08.2021	158.18	238.32	182.22	19.01.2022	166.96	238.32	151.09
19.08.2021	128.17	227.81	184.61	21.01.2022	135.00	228.34	141.72
20.08.2021	103.47	157.46	104.10	22.01.2022	129.49	225.28	153.92
21.08.2021	102.34	120.36	58.64	23.01.2022	185.12	242.98	152.42
22.08.2021	105.12	119.59	94.10	24.01.2022	150.04	232.60	150.56
23.08.2021	87.24	71.95	51.38	25.01.2022	177.60	241.25	146.83
26.08.2021	150.57	234.73	167.93	26.01.2022	187.09	242.98	147.51
27.08.2021	102.14	158.90	85.71	27.01.2022	175.23	241.91	158.68
29.08.2021	162.96	239.79	177.94	28.01.2022	145.29	230.20	149.54
30.08.2021	140.63	233.40	178.30	29.01.2022	154.98	233.27	148.54
31.08.2021	101.48	117.14	65.38	31.01.2022	171.87	240.72	151.23

ватність регресійної моделі перевірялась за критерієм Фішера. Розраховане значення критерію Фішера перевищує табличне $F_{кр}(5,32,0.05)$, що підтверджує статистичну адекватність моделі (4) експериментальним даним і можливість її використання для аналізу режимів роботи енергоблоку.

На основі результатів експериментальних досліджень були розроблені рекомендації щодо покращення режимів енергоблоків потужністю 210 МВт. Ці значення температури живильної води та електричної потужності, що дозволяють забезпечити потрібну температуру відхідних газів під час ведення режиму енергоблоку 210 МВт.

Значення в табл. 2 отримані шляхом розрахунку температури відхідних газів для заданих температури живильної води та електричної потужності на основі рівняння (4).

Обговорення отриманих результатів впливу експлуатаційних і режимних параметрів на температуру відхідних газів

Рівняння (3) і (4) підтверджують, що найбільший вплив на температуру відхідних газів має температура живильної води.

Лінійне рівняння (3) показує, що температура вихідних газів зменшується зі зростанням потужності та збільшується із підвищенням температури живильної води.

Квадратичне рівняння (4) дозволяє врахувати як лінійний, так і нелінійний вплив незалежних змінних. Це дозволяє точніше описати процеси теплопередачі та спалювання, особливо в умовах змінних режимів. Лінійне рівняння (3) використовується для приблизного оцінювання залежностей, тоді як квадратичне рівняння (4) краще підходить для точного опису складних взаємозв'язків. Воно враховує нелінійність впливу температури живильної води та потужності блоку на температуру вихідних газів.

Як видно з рис. 1, температура відхідних газів зростає на 4 °C при зміні температури живильної води на 10 °C у всьому діапазоні зміни електричної потужності. Влітку температура відхідних газів вища за показники зимового періоду. Це пояснюється тим, що температура живильної води впливає на розподіл теплоти в котлоагрегаті. При високій температурі живильної води економайзер стає менш ефективним у відборі теплоти, що збільшує теплові втрати через відхідні гази. При низькій температурі живильної води зменшується температура відхідних газів, однак можливе зниження загальної теплової ефективності котла через надмірне охолодження димових газів.

Для енергоблоків 210 МВт встановлено, що вплив електричної потужності на тем-

Таблиця 2. Рекомендовані значення температури живильної води та електричної потужності для отримання потрібних значень температури

Потужність, МВт	Температура живильної води, °C						
	220	225	230	235	240	245	250
100	180,1	—	—	—	—	—	—
105	170,1	—	—	—	—	—	—
110	160,2	—	—	—	—	—	—
115	150,2	179,7	—	—	—	—	—
120	140,3	169,8	—	—	—	—	—
125	130,3	159,9	—	—	—	—	—
130	120,4	149,9	179,5	—	—	—	—
135	110,5	139,9	169,5	—	—	—	—
140	—	130,1	159,6	—	—	—	—
145	—	120,1	149,6	179,2	—	—	—
150	—	110,2	139,7	169,24	—	—	—
155	—	—	129,75	159,29	—	—	—
160	—	—	119,81	149,35	178,89	—	—
165	—	—	109,86	139,4	168,94	—	—
170	—	—	—	129,46	158,99	—	—
175	—	—	—	119,51	149,05	178,59	—
180	—	—	—	109,57	139,11	168,65	—
185	—	—	—	—	129,16	158,7	—
190	—	—	—	—	119,22	148,78	178,3
195	—	—	—	—	109,27	138,81	168,35
200	—	—	—	—	—	128,87	158,41

пературу відхідних газів мінімальний. Для забезпечення більшої потужності потрібно спалювати більше палива, що призводить до підвищення об'ємної витрати димових газів. Температура відхідних газів може знижуватися через ефективніше використання теплоти у теплообмінниках (економізаторі, пароперегрівачах та інших). Результати аналізу рис. 2 показали, що в діапазоні $t_{\text{жв}} = (225-245)^\circ\text{C}$ температура відхідних газів є постійною і складає приблизно 150°C взимку і 180°C влітку. Вплив електричної потужності блоку на температуру відхідних газів пояснюється змінами в режимах роботи котлоагрегату, теплообмінних процесах та ефективності спалювання палива. Зі збільшенням або зменшенням електричного навантаження змінюються умови роботи всього енергоблоку.

Температура відхідних газів у котлоагрегатах влітку, як правило, вища, ніж узимку, через кілька взаємопов'язаних факторів, які впливають на теплові процеси. Влітку температура зовнішнього повітря вища, ніж узимку. Це повітря використовується для горіння палива, і його попереднє нагрівання в повітропідігрівнику потребує меншої кількості теплоти. Як наслідок, димові гази втрачають менше тепла, і їх температура на виході з котла залишається вищою.

Влітку електростанції часто працюють із меншим навантаженням через зменшений попит на теплову енергію для опалення. Зниження навантаження призводить до зменшення теплообміну в котлі, що знижує ефективність економізатора та інших теплообмінних елементів. Це зменшує охолодження димових газів і підвищує їхню температуру. У теплу пору року температура живильної води на вході в економізатор, як правило, вища через тепліше зовнішнє середовище та відсутність потреби у додатковому підігріві. Це зменшує теплове навантаження на економізатор, і, відповідно, димові гази віддають менше теплоти, що підвищує їхню температуру.

Дійсно, у період «аварійного ремонту» інших станцій, коли деякі з них не могли виконувати свої функції на повну потужність, Курахівська ТЕС могла взяти на себе до-

даткове навантаження. Це могло призвести до підвищення параметрів відхідних газів, оскільки для компенсації знижених потужностей інших станцій, Курахівська ТЕС, ймовірно, працювала на більш високих параметрах. Це може включати збільшення споживання палива, що в свою чергу призводить до підвищення температури і концентрації шкідливих викидів.

Метою створення табл. 1, що показує залежності температури димових газів від температури живильної води та потужності блоку, є покращення режимних та експлуатаційних параметрів енергоблоку Курахівської ТЕС. За допомогою цієї таблиці можна обирати найкращі показники для ведення потрібного режиму енергоблоку за завданням енергосистеми.

При нижчих температурах живильної води ($220-235^\circ\text{C}$) і середніх потужностях спостерігається більша варіативність температури димових газів. У діапазоні високих температур живильної води ($245-250^\circ\text{C}$) та потужностей близько 200 МВт система демонструє стабільність температури димових газів.

Найкращі результати з точки зору зниження температури димових газів досягаються при високих потужностях ($160-190$ МВт) і високих температурах живильної води ($240-245^\circ\text{C}$).

Особливістю дослідження є те, що підвищення ККД та зниження витрат палива є наслідком управління режимами роботи енергоблоку. На відміну від [3], де енергоефективність досягається за рахунок впровадження теплообмінників та рекуператорів, дані рекомендації щодо раціоналізації режимних параметрів дозволяють досягти аналогічних результатів без витрат на додаткове обладнання. Це стає можливим завдяки тому, що при зниженні температури відхідних газів зменшуються теплові втрати з відхідними газами (q_2), які мають безпосередній вплив на ККД котла.

Обмеження полягають в тому, що як видно з табл. 1, не для всіх значень температури живильної води та електричної потужності є можливість обрати раціональне значення температури відхідних газів. А також є необхідність обов'язково враховувати

режими роботи станції за диспетчерським графіком в об'єднаній енергосистемі.

Недоліком дослідження є те, що у певних точках, наприклад, при температурі живильної води 220 °С і потужності 130 МВт, температура димових газів значно вища порівняно з іншими точками. Це може бути наслідком нерівномірної роботи обладнання або зовнішніх впливів.

Тому, у подальших дослідженнях режимів роботи енергоблоків теплових електричних станцій планується додатково проведення аналізу впливу інших режимних та експлуатаційних параметрів на температуру відхідних газів. Таким чином отримані результати можуть використовуватись при розробці режимних карт для всіх енергоблоків ТЕС України.

Висновки

1. Проведено дослідження впливу температури живильної води на температуру димових газів для енергоблоку 210 МВт Курхівської ТЕС. Температура відхідних газів зростає у всьому діапазоні зміни електричної потужності.

2. Встановлено, що залежність $t_{\text{відх}} = f(N_E)$ при сталій температурі живильної води для всіх випадків ідентична: вплив електричної потужності на температуру відхідних газів мінімальний.

3. В результаті проведених розрахунків отримано функціональні залежності (лінійну та квадратичну) режимів роботи (навантажень при виробітку електроенергії та температури живильної води) та $t_{\text{відх}}$ для енергоблоку 210 МВт. Теплоенергетичні процеси точніше описує квадратична залежність.

4. Розроблено рекомендації щодо раціоналізації режимів роботи енергоблоку 210 МВт ТЕС. Оптимальні результати з точки зору зниження температури димових газів досягаються при високих потужностях і високих температурах живильної води. При цьому прослідковується підвищення ККД котла без зниження надійності поверхонь нагріву конвективної шахти і питомі витрати умовного палива зменшуються, наслідком чого є суттєва економія палива. Також є переваги з екологічної точки зору, а саме: відбувається одночасне зниження температури відхідних газів і викидів оксидів азоту і оксидів вуглецю.

Література

- [1] Кабінет Міністрів України. (2023). Про схвалення Енергетичної стратегії України на період до 2050 року (Розпорядження № 373-р від 21.11.2023). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/373-2023-%D1%80#Text>
- [2] Шелешей, Т. В. (2018). Взаємозв'язок температури відхідних газів і техніко-економічних та екологічних показників ТЕЦ. Вісник НТУ «ХП». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування, 11(1287), 32–35.
- [3] Nyakuma, B. B., Mahyon, N. I., Chiong, M. S., et al. (2023). Recovery and utilisation of waste heat from flue/exhaust gases: A bibliometric analysis (2010–2022). *Environmental Science and Pollution Research*, 30, 90522–90546. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-28791-4>
- [4] Oyedepo, S. O., & Fakeye, A. B. (2020). Electric power conversion of exhaust waste heat recovery from gas turbine power plant using organic Rankine cycle. *International Journal of Energy and Water Resources*, 4, 139–150. <https://doi.org/10.1007/s42108-019-00055-3>
- [5] Auld, A., Berson, A., & Hogg, S. (2013). Organic Rankine cycles in waste heat recovery: A comparative study. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 8(Suppl 1), 9–18. <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctt033>
- [6] Cao, Y., Gao, Y., Zheng, Y., & Dai, Y. (2016). Optimum design and thermodynamic analysis of a gas turbine and ORC combined cycle with recuperators. *Energy Conversion and Management*, 116, 32–41. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.02.073>
- [7] Carcasci, C., Ferraro, R., & Miliotti, E. (2014). Thermodynamic analysis of an organic Rankine cycle for waste heat recovery from gas turbines. *Energy*, 65, 91–100. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.11.080>
- [8] Mandi, R. P., & Yaragatti, U. R. (2012). Energy efficiency improvement of auxiliary power equipment in thermal power plant through operational optimization. In *Proceedings of the Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)* (pp. 1–8). [https://doi.org/978-1-4673-4508-8/12/\\$31.00](https://doi.org/978-1-4673-4508-8/12/$31.00)

- [9] Шелешей, Т. В. (2019). Розробка технічних рішень стосовно пониження температури димових газів при дослідженні впливу на них експлуатаційних і режимних параметрів. Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки, 30(69, Ч. 2, № 2), 48–53.
- [10] Montgomery, D. C. (2012). Design and analysis of experiments (8th ed.). John Wiley & Sons.
- [11] Cochran, W. G., & Cox, G. M. (1957). Experimental designs. John Wiley & Sons.
- [12] Eveloy, V., Rodgers, P., Olufade, A., Wang, Y., & Alili, A. A. (2016). Waste heat recovery from gas turbine flue gases for power generation enhancement in a process plant. International Journal of Thermal and Environmental Engineering, 12(1), 53–60. <https://doi.org/10.5383/ijtee.12.01.007>
- [13] Lion, S., & Lion, S. (2017). A thermodynamic feasibility study of an organic Rankine cycle (ORC) for heavy-duty diesel engine waste heat recovery in off-highway applications. International Journal of Energy and Environmental Engineering. <https://doi.org/10.1007/s40095-017-0234-8>

© Шелешей Т. В., Беднарська І. С., Романова К. О.

Дата першого надходження статті до видання: 21.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 17.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 15.05.2026



Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0