

## **ПІДВИЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ НАДІЙНОСТІ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ ОБЛАДНАННЯ КОТЕЛЬНИХ УСТАНОВОК ТЕПЛОЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ ШЛЯХОМ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ВИМІРЮВАНЬ ЇХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ**

**© Канюк Г.І., Фурсова Т.М., Мезеря А.Ю., Долматов О.А.,  
Заїка С.О., Галинський П.Р.**

*Українська інженерно-педагогічна академія*

### **Інформація про авторів:**

**Канюк Геннадій Іванович (Kaniuk Gennadii):** ORCID: 0000-0003-1399-9039; доктор технічних наук; завідувач кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій; Українська інженерно-педагогічна академія, вул. Університетська, 16, м. Харків, 61003, Україна.

**Фурсова Тетяна Миколаївна (Fursova Tetiana):** ORCID: 0000-0002-1423-0822; [tatiana2507@ukr.net](mailto:tatiana2507@ukr.net); кандидат технічних наук; доцент кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій; Українська інженерно-педагогічна академія, вул. Університетська, 16, м. Харків, 61003, Україна.

**Мезеря Андрій Юрійович (Mezeria Andrii):** ORCID: 0000-0003-2946-9593; [mezz@ukr.net](mailto:mezz@ukr.net); кандидат технічних наук; доцент кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій; Українська інженерно-педагогічна академія, вул. Університетська, 16, м. Харків, 61003, Україна.

**Долматов Олександр Андрійович (Dolmatov Oleksandr):** ORCID: 0009-0005-7842-5206; [olexandr.dolmatov@gmail.com](mailto:olexandr.dolmatov@gmail.com); аспірант кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій; Українська інженерно-педагогічна академія, вул. Університетська, 16, м. Харків, 61003, Україна.

**Заїка Сергій Олександрович (Zaika Serhii):** ORCID: 0009-0000-8311-1619; [zaika.serhii1@gmail.com](mailto:zaika.serhii1@gmail.com); аспірант кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій; Українська інженерно-педагогічна академія, вул. Університетська, 16, м. Харків, 61003, Україна.

**Галинський Павло Русланович (Halynskii Pavlo):** ORCID: 0009-0006-1721-5798; [pavlo.halynskii@gmail.com](mailto:pavlo.halynskii@gmail.com); аспірант кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій; Українська інженерно-педагогічна академія, вул. Університетська, 16, м. Харків, 61003, Україна.

У статті розглядається можливість підвищення експлуатаційної надійності та ефективності роботи теплових електростанцій для сталого розвитку сучасної вітчизняної енергетики та її безпечної експлуатації шляхом забезпечення якісних вимірів основних технологічних параметрів роботи відповідального обладнання – котельних установок. Проаналізовано значення теплових електростанцій у процесі стабільного розвитку енергетики, їх вплив на навколишнє середовище та необхідність зниження викидів шляхом застосування надійних та енергоефективних заходів. Для покращення якості вимірювань технологічних параметрів у котельних установках пропонується застосування високотемпературних плівкових термопар, які використовуються у вимірюванні високих температур в ракетній, авіаційній техніці і металургії, для вимірювання температур теплоносія в тракці парового котла, а також термометрування поверхні екранних труб котлів. Визначено особливості вимірвальних схем із високотемпературними плівковими термопарами для підвищення експлуатаційної надійності та ефективності роботи котельних установок теплоелектростанцій. В умовах тракту котельної установки конструктивно неможливо винести місце приєднання компенсаційних проводів до зони порівняно помірних температур, тому для усунення зазначеного недоліку були використані комбіновані компенсаційні дротяні термоелектроди, які за допомогою апаратного налаштування мають у діапазонах температур спостережень градувальні характеристики, близькі до характеристик плівкових електродів. Для вибраних високотемпературних термопар із матеріалів Au<sub>65</sub>Pd<sub>35</sub> - Pt<sub>90</sub>Rh<sub>10</sub> були застосовані стандартні термоелектроди із алюмелі і копелі для негативної гілки (Au<sub>65</sub>Pd<sub>35</sub>) та хромелі й алюмелі для позитивної гілки (Pt<sub>90</sub>Rh<sub>10</sub>).

Для апробації запропонованого технічного рішення були проведені експериментальні налаштування компенсаційних комбінованих термоелектродів, що використовуються у вимірвальних ланцюгах із високотемпературними плівковими термопарами, які проводились на котлі ТПП-312 Зміївської ТЕС. Результати досліджень можуть бути використані для котельних установок теплоелектростанцій, а також і для парогенераторів атомних електростанцій.

**Ключові слова:** енергетика, котельна установка, високотемпературні плівкові термопари.

**Kaniuk G., Fursova T., Boyko T., Dyadyura K., Dolmatov O., Zaika S., Halynskii P.**  
Increasing the Operational Reliability and Efficiency of Boiler Plant Equipment of Thermal Power Stations by Improving the Quality of Measuring their Technological Parameters.

The present article examines the potential to enhance the operational reliability and safety of domestic energy systems by focusing on the accurate measurement of key technological parameters pertaining to the operation of boiler plants. Given the pivotal role of thermal power stations in facilitating sustainable energy development, the article delves into their environmental impact and emphasizes the imperative of mitigating emissions through the adoption of reliable and energy-efficient measures. To enhance the precision of technological parameter measurements in boiler plants, the utilization of high-temperature film thermocouples is proposed. These thermocouples are commonly employed in high-temperature measurements within the fields of rocketry, aviation technology, and metallurgy. In this context, their application is suggested for the measurement of heat-transfer agent temperatures in the steam boiler system, as well as for the temperature measurement of boiler water-wall tube surfaces. The article identifies the unique attributes of measurement circuits utilizing high-temperature film thermocouples, which contribute to the improved operational reliability and efficiency of boiler plants within thermal power stations. It is acknowledged that due to the structural constraints within the boiler plant system, it is not feasible to situate the connection point of compensating wires in areas of relatively moderate temperatures. To address this limitation, a solution is proposed wherein combined compensating wire thermo-electrodes are employed. Through hardware adjustment, these thermo-electrodes exhibit grading characteristics that closely align with the characteristics of film electrodes within the temperature ranges of observation. For selected high-temperature thermocouples made of  $Au_{65}Pd_{35}$  -  $Pt_{90}Rh_{10}$  materials, standard thermos-electrodes made of alumel and copele for the negative branch ( $Au_{65}Pd_{35}$ ), and chromel and alumel for the positive branch ( $Pt_{90}Rh_{10}$ ) were used. In order to validate the proposed technical solution, a series of experimental tests were conducted to evaluate the performance of compensating combined thermo-electrodes within measurement circuits incorporating high-temperature film thermocouples. These experiments were specifically carried out at the ТПП-210А boiler located at Zmiiv Thermal Power Station. Research results can be used for boiler plants of thermal power stations, as well as for steam generators of nuclear power stations.

**Keywords:** energy, boiler plant, high-temperature film thermocouples.

**Постановка проблеми та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями**

Енергія є стійкою, якщо вона «задовольняє потреби сьогодення, не ставлячи під загрозу здатність майбутніх поколінь задовольняти власні потреби» [1]. Викопне паливо забезпечує 85% світового споживання енергії, а енергетична система відповідає за 76% глобальних викидів парникових газів. Скорочення викидів парникових газів до рівнів, що відповідають Паризькій угоді 2015 року, вимагатиме загальносистемного перетворення способів виробництва, розподілу та споживання енергії. Спалювання копалин палива є

основним джерелом забруднення повітря, яке, за оцінками, щорічно призводить до загибелі 7 мільйонів людей. Тому дуже актуальними є завдання підвищення експлуатаційної надійності та ефективності роботи теплоенергетичного обладнання [2-3].

Підвищення ККД електростанцій призводить до скорочення витрати палива, отже, і викидів у довкілля [4-5]. Ефективність роботи електростанцій визначається їх надійною експлуатацією та безаварійною роботою, для чого необхідні якісні виміри основних технологічних параметрів.

#### **Аналіз останніх досліджень і публікацій**

До основного енергетичного обладнання теплоелектростанцій відносяться парові котли (парогенератори). Їх конструкція, принцип роботи та технологічні процеси розглядаються в роботах [4-8]. Питанням енерго- та ресурсозбереження у котельних установках присвячені роботи [9-12].

У роботах [13-14] запропоновано та обґрунтовано застосування високотемпературних плівкових термопар (ВПТ) для вимірювання високих температур конструкцій авіаційних та ракетних двигунів, а також у металургії. Отримані результати можна розглядати як застосування ВПТ для вимірювання температур теплоносія в тракці парового котла, а також термометрування поверхні екранних труб парових котлів.

**Метою роботи** є аналіз можливостей підвищення експлуатаційної надійності та ефективності обладнання котельних установок теплоелектростанцій шляхом підвищення якості вимірювань їх технологічних параметрів.

#### **Виклад основного матеріалу**

Особливістю вимірвальних схем з ВПТ є необхідність додаткового роз'єму – області, в якій до плівкових термоелектродів приєднуються відвідні (компенсаційні) термоелектродні дроти [13-14].

Термоелектрична електрорушійна сила (термо ЕРС) плівкових електродів відрізняється від термо ЕРС дротяних електродів з однакових матеріалів. При досить високій температурі додаткового роз'єму це призводить до значних похибок у вимірі температур.

У загальному випадку, коли термоелектрична характеристика відвідних дротяних електродів  $\ddot{A}_{CD}(t,0)$  відрізняється від характеристики пари плівкових електродів  $\ddot{A}_{AB}(t,0)$  (рис. 1) справедливий вираз:

$$\ddot{A}_{AB}(t,0) = E + \Delta E(t,0),$$

де  $\ddot{A}_{CD}(t,0) = \ddot{A}_{AB}(t_0,0) - \ddot{A}_{CD}(t_0,0)$ ;

$t$  – температура спаю ВПТ, °С;

$t_0$  – температура додаткового роз'єму, °С;

$\ddot{A}$  – виміряна термо ЕРС.

Таким чином, в цьому випадку необхідно крім реєстрації основного сигналу  $\ddot{A}$  визначати також температуру місця під'єднання відвідних проводів і вводити відповідну поправку  $\Delta E(t,0)$ , що часто є настільки ж складним завданням, як і визначення основного сигналу. Адже в умовах тракту котельної установки конструктивно неможливо винести місце приєднання компенсаційних проводів до зони навіть порівняно помірних температур.

Для усунення зазначеного недоліку були використані розглянуті в роботі [15] комбіновані компенсаційні дротяні термоелектроди, які за допомогою апаратного налаштування мають у діапазонах температур, що спостерігаються, градувальні характеристики, близькі до характеристик плівкових електродів.

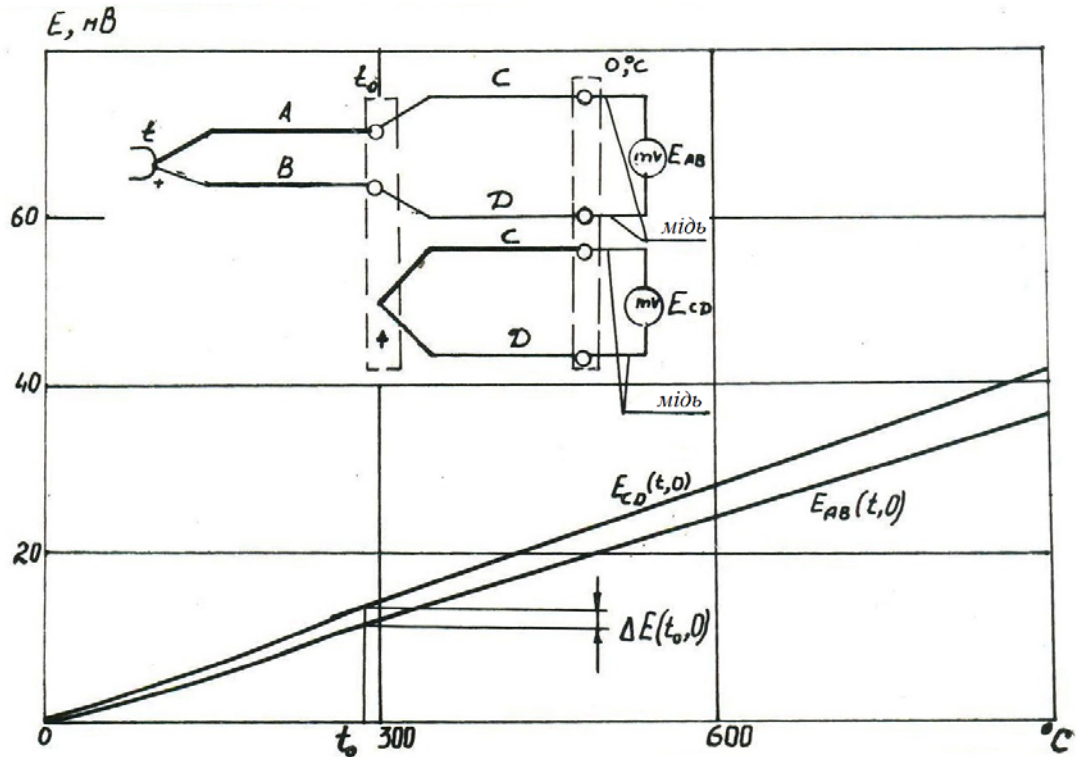


Рис. 1 – Принципові особливості вимірвальної схеми з ВПТ

Вираз еквівалентної термо ЕРС багатожильного дроту, що складається з різних матеріалів, наступний [15]:

$$E_{ек} = E_1 \frac{R_1}{R_1 + R_2 + \dots + R_n} (E_1 \ E_2 \ \dots \ E_n), \quad (1)$$

де  $E_1, E_2, E_n$  – термо ЕРС окремих дротів 1, 2, ..., n відносно платинового електрода порівняння;  $R_1, R_2, R_n$  – електричні опори окремих дротів 1, 2, ..., n.

Для ланцюга з двох дротів формула (1) має вигляд:

$$E_{ек} = E_1 \frac{E_2 R_1 + E_1 R_2}{R_1 + R_2 + \dots + R_n} = \frac{E_1 K + E_2}{1 + K}, \quad (2)$$

де  $K = \frac{R_1}{R_2}$  – коефіцієнт настройки.

Умовою компенсації похибки сигналу, що відповідає сигналу основного термоелектрода комбінованим дротяним електродом при температурі роз'єму  $t_0$ , є виконання наступного співвідношення:

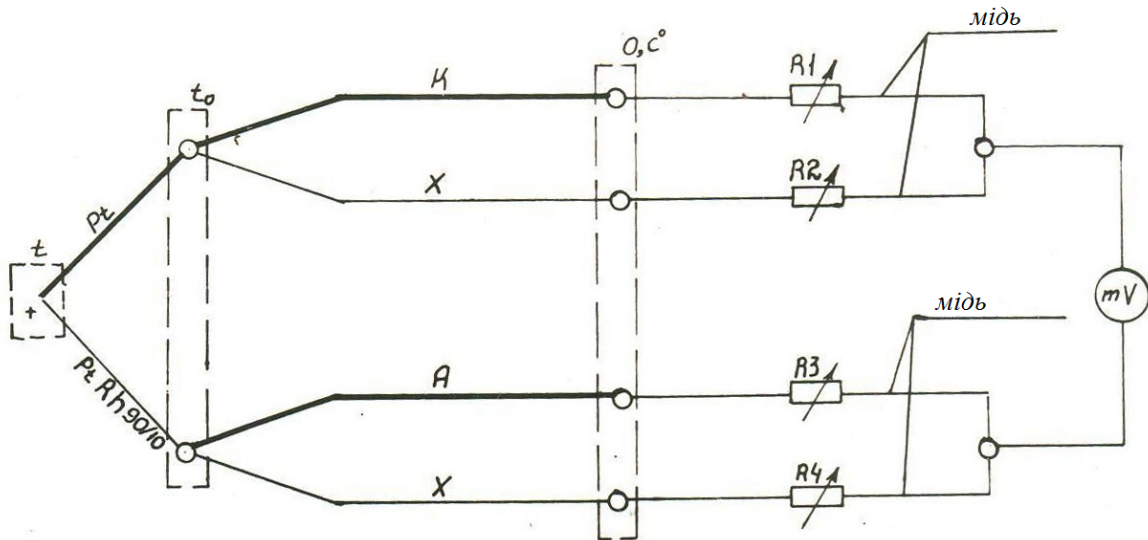
$$E_{оос}(t_0) = E_{ек}(t_0) \frac{E_1(t_0) K_{t_0} + E_2}{1 + K_{t_0}}, \quad (3)$$

де  $K_{t_0} = \frac{E_1(t_0) - E_{оос}(t_0)}{E_{оос}(t_0) - E_2(t_0)}$ .

Необхідне відношення опорів гілок комбінованого дроту на практиці здійснюється паралельним з'єднанням різнорідних стандартних дротяних термоелектродів із регульованими опорами, що підключаються (рис. 2). Налаштування компенсаційних комбінованих електродів здійснюється шляхом підбору опорів  $R_1 - R_4$  за температури  $t_0$  - місця роз'єму.

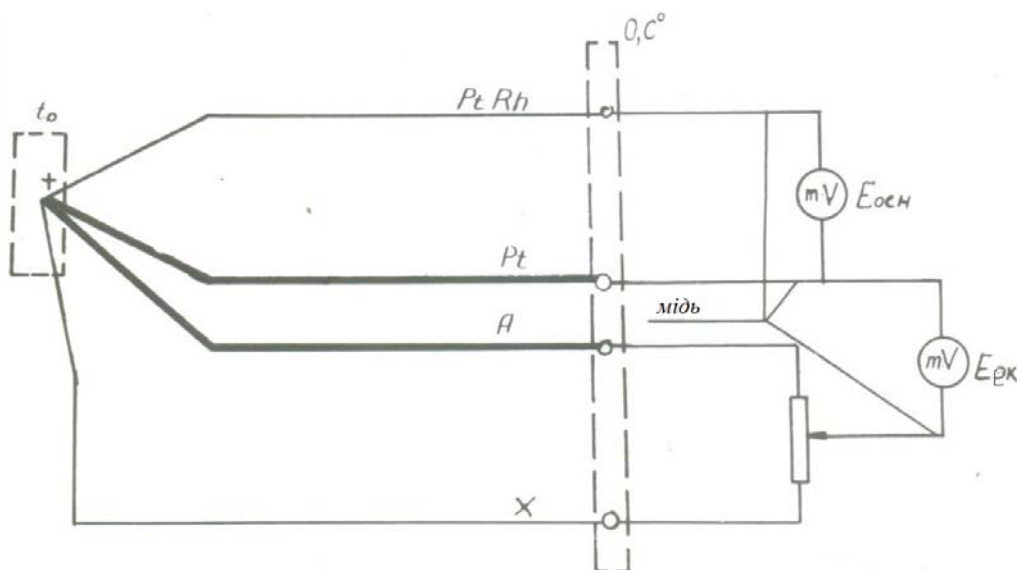
Як комбіновані компенсаційні термоелектроди для вибраних ВПТ із матеріалів  $Au_{65}Pd_{35}$  -  $Pt_{90}Rh_{10}$  нами були застосовані такі стандартні термоелектроди: негативна гілка ( $Au_{65}Pd_{35}$ ) – дроти з алюмелі та копелі; позитивна гілка ( $Pt_{90}Rh_{10}$ ) – дроти з хромелі та алюмелі.

Для ВПТ  $Pt_{100}$  -  $Pt_{90}Rh_{10}$  застосовували такі термоелектроди: негативна гілка ( $Pt_{100}$ ) – дроти з хромелі та копелі; позитивна гілка ( $Pt_{90}Rh_{10}$ ) – дроти з хромелі та алюмелі.



**Рис. 2** – Принципова схема виконання поелектродної компенсації при вимірюванні температур за допомогою ВПТ з  $Pt_{100}$  -  $Pt_{90}Rh_{10}$  термоелектродами

На практиці підбір стандартних проводів із заданими термоелектродними властивостями ускладнений, тому налаштування компенсаційних комбінованих електродів розрахунковим шляхом може призвести до суттєвих помилок. Звідси, налаштування практично проводиться експериментально шляхом налаштування змінних опорів  $R_1 - R_4$  з наступною перевіркою величини  $E_{ек}$  по всьому діапазоні можливих температур роз'єму. Схема налаштування наведена на рис. 3.



**Рис. 3** – Схема налаштування комбінованих компенсаційних термоелектродів, що використовуються при вимірюванні температури за допомогою ВПТ

Експериментальні дані були отримані для котельної установки ТПП-312 Зміївської ТЕС.

Результати експериментального налаштування компенсаційних комбінованих термоелектродів, що використовуються у вимірвальних ланцюгах з ВПТ, наведені в таблиці.

**Таблиця 1** – Результати експериментального налаштування компенсаційних комбінованих термоелектродів

ВПТ Au <sub>65</sub> Pd <sub>35</sub> - Pt <sub>90</sub> Rh <sub>10</sub>	t, °C	E <sub>ек</sub> , мВ	E <sub>осн</sub> , мВ	ΔE = E <sub>осн</sub> – E <sub>ек</sub> , мВ	Δt = Δt (ΔE), °C
Експеримент 1	50	1,75	1,73	-0,02	0,5
	100	3,65	3,65	0	0
	150	5,775	5,74	-0,035	-0,8
Експеримент 2	50	1,695	1,73	0,035	1
	100	3,70	3,65	-0,05	-1,4
	150	5,825	5,74	-0,085	-1,5
Експеримент 3	50	1,72	1,73	0,01	0,3
	100	3,625	3,65	0,025	0,7
	150	5,775	5,74	-0,035	-0,5
ВПТ – Pt - Pt <sub>90</sub> Rh <sub>10</sub>	t,	E <sub>ек</sub> , мВ	E <sub>осн</sub> , мВ	ΔE = E <sub>осн</sub> – E <sub>ек</sub> , мВ	Δt = Δt (ΔE), °C
Експеримент 1	50	0,275	0,281	0,045	-0,8
	100	0,614	0,607	0,0071	1
	150	0,978	0,968	0,01	1,3
Експеримент 2	50	0,279	0,281	0,002	-0,4
	100	0,601	0,607	0,0063	0,9
	150	0,98	0,968	0,0123	1,6
Експеримент 3	50	0,2377	0,281	0,004	-0,7
	100	0,615	0,607	0,0079	1,1
	150	0,977	0,968	0,0092	1,2

### Висновки

Якісні виміри основних технологічних параметрів роботи котельних установок необхідні для сталого розвитку сучасної енергетики.

Для покращення якості вимірювань технологічних параметрів у котельних установках пропонується застосування ВПТ для вимірювання температур теплоносія у тракці парового котла, а також для термометрування поверхні екранних труб парових котлів.

Проаналізовано особливості вимірвальних схем з ВПТ для підвищення експлуатаційної надійності та ефективності роботи котельних установок теплоелектростанцій.

Проведено експериментальне налаштування компенсаційних комбінованих термоелектродів, що використовуються у вимірвальних ланцюгах з ВПТ.

Результати досліджень можуть бути використані і для парогенераторів АЕС.



**Список використаних джерел:**

1. Sustainable energy. – Access mode : [https://en.wikipedia.org/wiki/Sustainable\\_energy](https://en.wikipedia.org/wiki/Sustainable_energy). (Last accessed 11.05.2023).
2. Destination 2030. Accelerating progress on the Sustainable Development Goals. – Access mode : <https://www.undp.org/destination-2030-accelerating-progress-sustainable-development-goals>. (Last accessed 11.05.2023).
3. Energy Community. – Access mode : <https://www.energy-community.org/Ukraine/overview.html>. (Last accessed 11.05.2023).
4. Енергетика: історія, сучасність та майбутнє. – Режим доступу : <http://energetika.in.ua/ua/books/book-3>. (дата звернення 11.05.2023).
5. Резников М. И. Паровые котлы тепловых электростанций / М. И. Резников, Ю. М. Липов. – М.: Мир, 1981.
6. Koziol J. An optimization strategy using probabilistic and heuristic input data for fuel feeding boilers with regards to the trading effects at CO<sub>2</sub> allowances / J. Koziol, J. Czubala // *Energy*. – 2013. – Vol. 62. DOI: 10.1016/j.energy.2013.03.079.
7. Ion I. Effect of Energy Modernization of a Steam Boiler on the Economic Efficiency / I. Ion, I. Stanciu // *Annual conference of the University of Rousse*. – 2013. – Vol. 52. – Access mode : <https://conf.uni-ruse.bg/bg/docs/cp13/1.2/1.2-4.pdf> (Last accessed 11.05.2023).
8. Wang Mechanism modeling of optimal excess air coefficient for operating in coal fired boiler / Y. Wang, X. Li, T. Mao, P. Hu, X. Li, G. – *Energy*. – 2022. – Part A. DOI:10.1016/j.energy.2022.125128.
9. Мисак Й. С. Вплив якості палива на техніко-економічні показники котельних установок ТЕС / Й. С. Мисак // *Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Теплоенергетика. Інженерія доквілля. Автоматизація*. – Львів, 2000. – № 399. – С. 89–96.
10. Резервы энергосберегающего управления технологическими процессами на действующих ТЭС и АЭС / Г. И. Канюк [и др.]. – Харьков : Точка, 2012. – 184 с.
11. Дуэль М. А. Развитие систем энергосберегающего автоматизированного управления энергопроизводством ТЭС и АЭС Украины / М. А. Дуэль, Г. И. Канюк, А. Ю. Мезеря. – Харьков : Точка, 2013. – 388 с.
12. Канюк Г. И. Методы и модели энергосберегающего управления энергетическими установками электростанций / Г. И. Канюк, А. Ю. Мезеря, И. В. Сук. – Харьков : Точка, 2016. – 332 с.
13. Симбирский Д. Ф. Температурная диагностика двигателей (пленочная термометрия и оптимальные оценки) / Д. Ф. Симбирский. – Киев : Техника, 1976. – 208 с.
14. А. с. № 1712797 СССР, МКИ G 01 K 7/02. Способ изготовления высокотемпературной термопары / Гулей А. Б., Скрипка А. И., Симбирский Д. Ф., Маштылева А. П., Олейник А. В. // *Открытия. Изобретения*. – 1992. - № 6.
15. Григорьев Л. С. Устранение погрешностей ВПТ, вызванных паразитными термопарами в измерительной цепи / Л. С. Григорьев, Д. Ф. Симбирский, А. В. Олейник // *Экспериментальные методы термостойкости газотурбинных двигателей*. Вып. 1. – Харьков, 1973. – С. 47–52.

**References:**

1. Wikipedia n.d. *Sustainable energy*, viewed 11 May 2023, <[https://en.wikipedia.org/wiki/Sustainable\\_energy](https://en.wikipedia.org/wiki/Sustainable_energy)>
2. Destination 2030. Accelerating progress on the Sustainable Development Goals, viewed 11 May 2023, <<https://www.undp.org/destination-2030-accelerating-progress-sustainable-development-goals>>.
3. Energy Community n.d., viewed 11 May 2023, <<https://www.energy-community.org/Ukraine/overview.html>>.
4. Enerhetyka: istoriia, suchasnist ta maibutnie n.d., [*Energy: history, modernity and the future*], viewed 11 May 2023, <<http://energetika.in.ua/ua/books/book-3>>.
5. Reznikov, MY & Lypov, MY 1981, *Parovie kotli teplovikh elektrostantsyi*, [*Steam boilers in thermal power plants*], Myr, Moskva.
6. Koziol, J & Czubala, J 2013, ‘An optimization strategy using probabilistic and heuristic input data for fuel feeding boilers with regards to the trading effects at CO<sub>2</sub> allowances’ *Energy*, Vol. 62, DOI: 10.1016/j.energy.2013.03.079.
7. Ion, I & Stanciu, I 2013, ‘Effect of Energy Modernization of a Steam Boiler on the Economic Efficiency’ *Annual conference of the University of Rousse*, Vol. 52, viewed 11 May 2023, <<https://conf.uni-ruse.bg/bg/docs/cp13/1.2/1.2-4.pdf>>.

8. Wang, Y, Li, X, Mao, T, & Hu, P 2022, 'Wang Mechanism modeling of optimal excess air coefficient for operating in coal fired boiler' *Energy*, part A, [DOI:10.1016/j.energy.2022.125128](https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125128).
9. Mysak, YS 2000, 'Vplyv yakosti palyva na tekhniko-ekonomichni pokaznyky kotelnykh ustanovok TES', [*Influence of fuel quality on technical and economic performance of thermal power plant boilers*], *Visnyk Natsionalnoho universytetu «Lvivska politekhnika». Teploenerhetyka. Inzheneriia dovkillia. Avtomatyzatsiia*, no 399, pp. 89–96.
10. Kaniuk, HI 2012, *Rezervi enerhosberehaiushcheho upravleniia tekhnolohycheskymy protsessamy na deistviushchykh TES y AES*, [*Reserves for energy-saving process control at operating thermal power plants and nuclear power plants*], Tochka, Kharkov.
11. Duel, MA, Kaniuk, HI & Mezeria, AYU 2013, *Razvytye system enerhosberehaiushcheho avtomatyzirovannoho upravleniia enerhoproyzvodstvom TES y AES Ukraini*, [*Development of energy-saving automated energy management systems for Ukrainian TPPs and NPPs*], Tochka, Kharkov.
12. Kaniuk, HY, Mezeria, AYU & Suk, YV 2016, *Metodi y modely enerhosberehaiushcheho upravleniia enerhetycheskymy ustanovkamy elektrostantsyi*, [*Methods and models for energy-saving control of power plants*], Tochka, Kharkov.
13. Symbyrskyi, DF 1976, *Temperaturnaia dyahnostyka dvyhatelei (plenochnaia termometryia y optimalnye otsenky)*, [*Temperature diagnostics of engines ( foil thermometry and optimum estimates)*], Tekhnika, Kyev.
14. Hulei, AB, Skrypka, AY, Symbyrskyi, DF, Mashtileva, AP. & Oleinyk, AV 1992, *Sposob yzghotovleniia visokotemperaturnoi termopari*, [*Method of producing a high-temperature thermocouple*], № 1712797 SSSR.
15. Hryhorev, LS, Symbyrskyi, DF & Oleinyk, AV 1973, 'Ustraneniye pohreshnostei VPT, vizvannikh parazytnimy termoparamy v yzmyrytelnoi tsepy', [*Correction of HPT errors caused by parasitic thermocouples in the measuring circuit*], *Ekspyrymentalnie metody termoprochnosti hazoturbynnikh dvyhatelei*, no. 1, pp. 47– 52.

Стаття надійшла до редакції 12 травня 2023 року