

В. І. КРАВЧЕНКО

кандидат технічних наук, доцент,  
доцент кафедри гідротехнічного будівництва, водної  
та електричної інженерії  
Херсонський державний аграрно-економічний університет  
ORCID: 0000-0003-2245-7194

## ВИПРОБУВАННЯ ВОДОГРІЙНОГО КОТЕЛЬНОГО АГРЕГАТУ В РЕЖИМІ СПАЛЮВАННЯ КОМПОЗИТНИХ БІОПАЛИВНИХ ПЕЛЕТ, ВИГОТОВЛЕНИХ НА ОСНОВІ ОСАДІВ СТІЧНИХ ВОД

Стаття присвячена теплотехнічним випробуванням пелетного водогрійного котельного агрегату для опалювання приміщень. Як паливо для спалювання використовувалися композитні пелети, що склалися з осадів стічних вод (80%) та лушпиння соняшника (20%). Вибір композитного палива на основі осадів стічних вод пояснюється тим, що їх утилізація є нагальною проблемою всіх очисних споруд населених пунктів. Технологія очистки стічних вод, що застосовується на ОКВП «Дніпро-Кіровоград», не передбачає утилізацію мулових відходів, що утворюються на каналізаційних очисних спорудах, сировина з яких була надана для проведення досліджень. Серед низки методів переробки мулових осадів, одним із перспективних є термічна утилізація. Реалізація такого методу дозволить не тільки забезпечити вимоги до охорони довкілля, а і використовувати енергетичний ресурс таких відходів. Основною метою проведення теплотехнічних випробувань водогрійного котельного агрегату АОВА-20 в режимі спалювання партії зразків композитних біопаливних пелет на основі осадів стічних вод було визначення ККД котла. В роботі розроблено методуку проведення теплотехнічних випробувань котельного агрегату. При теплотехнічних випробуваннях умови дослідження дозволили задіяти контур «водогрійний котел-система опалення», що дало можливість визначити ККД котельного агрегату на основі балансу за прямим методом. При застосуванні такого підходу до визначення ККД була розроблена методика визначення корисної теплоти  $Q_1$ , витраченої в системі опалення і наявної теплоти  $Q_2$ , виділеної при спалюванні композитного біопалива. В результаті теплотехнічних випробувань котельного агрегату в режимі спалювання зразків біопаливних пелет, виготовлених на основі осадів стічних вод, визначений за методом прямого балансу ККД котельного агрегату становив 85%.

**Ключові слова:** осади стічних вод, утилізація, композитні біопаливні пелети, водогрійний котельний агрегат, термічна утилізація, ККД котельного агрегату.

V. I. KRAVCHENKO

Candidate of Technical Science, Associate Professor,  
Associate Professor at the Department of Hydraulic Construction, Water  
and Electrical Engineering  
Kherson State Agrarian and Economic University  
ORCID: 0000-0003-2245-7194

## TESTING OF A WATER HEATING BOILER UNIT IN THE COMBUSTION MODE OF COMPOSITE BIOFUEL PELLETS MADE ON THE BASIS OF SEWAGE SLUDGE

The article is devoted to thermal testing of a pellet water-heating boiler unit for heating premises. Composite pellets consisting of sewage sludge (80%) and sunflower husks (20%) were used as fuel for combustion. The choice of composite fuel based on sewage sludge is explained by the fact that their disposal is an urgent problem of all sewage treatment plants in settlements. The wastewater treatment technology used at the Dnipro-Kirovograd Wastewater Treatment Plant does not provide for the disposal of sludge waste generated at sewage treatment plants, the raw materials from which were provided for research. Among a number of methods for processing sludge, one of the most promising is thermal utilization. The implementation of such a method will allow not only to meet environmental protection requirements, but also to use the energy resource of such waste. The main purpose of conducting thermal tests of the AOVA-20 water heating boiler unit in the combustion mode of a batch of composite biofuel pellet samples based on sewage sludge was to determine the boiler efficiency. The work developed a methodology for conducting thermal tests of the boiler unit. During thermal tests, the research conditions allowed using the "water heating boiler-heating system" circuit, which made it possible to determine the boiler unit efficiency based on the balance using the direct method. When using this approach

to determining the efficiency, a methodology was developed for determining the useful heat  $Q_1$  consumed in the heating system and the available heat  $Q_n$  released during the combustion of composite biofuel. As a result of thermal tests of the boiler unit in the combustion mode of biofuel pellet samples made on the basis of sewage sludge, the boiler unit efficiency determined by the direct balance method was 85%.

**Key words:** sewage sludge, utilization, composite biofuel pellets, hot water boiler unit, thermal utilization, boiler unit efficiency.

### Постановка проблеми

Наявні в Україні технології очисних вод не передбачають утилізацію або використання осадів стічних вод (ОСВ), які утворюються на каналізаційних очисних спорудах [1]. Наразі згідно норм діючого законодавства у сфері водовідведення і водокористування [1] необхідно здійснювати утилізацію (переробку) свіжих та накопичених ОСВ, які роками зберігаються на мулових майданчиках КОС [2].

Серед низки способів їх переробки, найбільш перспективним методом, який набуває широкого розповсюдження у різних країнах, можна виділити термічну утилізацію [3, 4]. Технологічна реалізація зазначеного способу утилізації дозволяє не тільки зменшити обсяг ОСВ та забезпечити вимоги до охорони природного середовища, а й використати їх енергетичний ресурс.

Термохімічні процеси, зокрема спалювання, можуть стати домінуючими методами утилізації осадів стічних вод у найближчому майбутньому. Застосовуючи переробку у такий спосіб, можна досягнути ефективного скорочення обсягу осаду, повного знищення шкідливих речовин і можливість рекуперації значної кількості енергії, що міститься у стічних водах.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

ОСВ характеризуються різними властивостями та мінливістю складу. Щоб підвищити енергетичний потенціал ОСВ, їх доцільно змішувати з іншими відходами, зокрема рослинними. Також, щоб осади були придатні для процесу спалювання, їх необхідно перетворити на форму відповідного палива, що застосовується при спалюванні, наприклад у пелетних котельних агрегатах [5].

В роботах [6,7] проведено дослідження по визначенню фізико-технічних умов використання мулових осадів стічних вод для виробництва біопалива та експериментально апробовано виготовлення його зразків, показано доцільність використання композитної сировини для виготовлення біопалива на основі мулових осадів стічних вод, теплота згоряння яких вище 18,0 МДж/кг.

В роботі [8] проведена підготовка до впровадження термічної утилізації мулових осадів ОКВП «Дніпро-Кіровоград» з визначенням технологічних умов, підбором пресового обладнання для виготовлення дослідної партії біопаливних пелет для теплотехнічних випробувань та вироблено на ньому зразки пелет із композитної сировини складом ОСВ-80% + лушпиння соняшника-20%. Загалом, останні літературні джерела підтверджують технічну здійсненність спалювання ОСВ разом з іншими відходами, або як композитного палива на основі осадів [9].

### Формулювання мети дослідження

Основною метою теплотехнічних випробувань було визначення ККД водогрійного котельного агрегату в режимі спалювання партії зразків композитних біопаливних пелет на основі ОСВ.

### Викладення основного матеріалу дослідження

Об'єктом теплотехнічних випробувань був водогрійний котел АОВА-20 виробництва ТДВ «Дозавтомати» (місто Кропивницький) [5], призначений для опалення приміщення площею 200 м<sup>2</sup>.

#### Технічні характеристики котельного агрегату АОВА-20

|   |               |
|---|---------------|
| Номінальна теплова потужність, ( $Q_{ном}$ ), кВт         | 20            |
| Площа обігріву, м <sup>2</sup>                            | 200           |
| Витрата палива, кг/год                                    | не більше 4,2 |
| ККД, %  | 85-87         |
| Максимальна температура води на виході, ( $T_{max}$ ), °C | 90            |
| Робочий тиск в котлі, ( $P_p$ ), МПа                      | не більше 0,1 |
| Оптимальна витрата води, м <sup>3</sup> /год              | 0,5           |
| Об'єм води в котлі, дм <sup>3</sup>                       | 70            |

Для спалювання як паливо використовувалися композитні біопаливні пелети діаметром 16 мм і щільністю  $\rho = 870$  кг/м<sup>3</sup>, виготовлені на основі мулових осадів стічних вод складом: 80% мулові осади + 20% лушпиння соняшника. Загальний вигляд зразків композитних біопаливних пелет показано на рисунку 1.



Рис. 1. Зразки композитних пелет, виготовлених на основі ОСВ

Визначити коефіцієнт корисної дії котла в режимі спалювання композитних біопаливних пелет можна за методом теплового балансу [10-12].

Відомо, що ефективність використання палива в котлоагрегаті визначається двома основними факторами: повнотою процесу спалювання палива і глибиною охолодження продуктів згоряння.

Більша частина теплоти, яка вноситься у котельний агрегат сприймається поверхнями нагріву і передається робочому тілу. За рахунок цієї теплоти відбувається нагрів води до потрібної температури і це корисно спожита теплота. Решта теплоти, що складає приблизно 5...20% не використовується на нагрівання води. Це пояснюється втратами теплоти, що супроводжують роботу котла.

Розподіл корисної теплоти та внесеної теплоти у котлоагрегат проводиться шляхом складання теплового балансу котла. У загальному вигляді рівняння теплового балансу водогрійного котла при усталеному режимі роботи записується наступним чином [11]:

$$Q_n = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6. \quad (1)$$

де  $Q_n$  – наявна теплота на 1 кг робочого палива, кДж/кг;

$Q_1$  – корисно використана теплота, кДж/кг;

$Q_2$  – втрати теплоти з відхідними газами, кДж/кг;

$Q_3$  – втрати теплоти від хімічної неповноти згоряння, кДж/кг;

$Q_4$  – втрати теплоти від механічної неповноти згоряння, кДж/кг;

$Q_5$  – втрати теплоти у навколишнє середовище через огороження котла, кДж/кг;

$Q_6$  – втрати з фізичною теплотою шлаку, кДж/кг.

Якщо обидві частини рівняння (1) розділити на  $Q_n$ , то отримаємо

$$q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6 = 100\%. \quad (2)$$

Відношення корисної теплоти до наявної є коефіцієнт корисної дії (ККД);

$$Q_1 / Q_n = q_1 = \eta_k. \quad (3)$$

ККД котла може бути визначений за прямим або за зворотним балансом [10, 11]. Останнє рівняння є визначенням ККД котла за прямим балансом у загальному вигляді. ККД за зворотним балансом визначається за формулою

$$\eta_k = 100 - (q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6). \quad (4)$$

Наявна теплота у загальному випадку визначається за рівнянням:

$$Q_n = Q_n^p + Q_{нал} + Q_{нов.з} + Q_{форс}, \quad (5)$$

де  $Q_n^p$  – нижча теплота згоряння палива на робочу масу, кДж/кг;

$Q_{нал}$  – фізична теплота палива, кДж/кг;

$Q_{нов.з}$  – фізична теплота підігрітого повітря, кДж/кг;

$Q_{форс}$  – теплота, що вноситься паром при паровому розпиленні палива, кДж/кг.

При спалюванні у котлі АОВА-20  $Q_{нов.з} = Q_{форс} = 0$ , а теплотою  $Q_{нал}$  можна нехтувати. Тому для такого випадку  $Q_n \approx Q_n^p$ . Для умов проведення теплотехнічних випробувань приймалося [12]:

$$Q_n \approx M_n \cdot Q_n^p \quad (6)$$

де  $M_n$  – маса спалених композитних біопаливних пелет, кг.

Корисна теплота для котла АОВА- 20 визначалася за виразом [11,12]

$$Q_1 = m_e c_e (t_{вх} - t_{вх}), \tag{7}$$

де  $m_e$  – маса води, прокачана циркуляційним насосом через котел при усталеному режимі роботи котла за час проведення випробувань, кг;

$c_e$  – теплоємність води, кДж/(кг · К);

$t_{вх}$  і  $t_{вх}$  – температура води на вході і виході з котла, °С.

Тоді ККД котла можна визначити прямим методом:

$$\eta_k = Q_1 / (B_n \cdot Q_{н}^p), \tag{8}$$

де  $B_n$  – маса композитних біопаливних пелет, витрачена за період роботи котла при усталеному режимі спалювання, кг.

При теплотехнічних випробуваннях котла АОВА-20 в режимі спалювання зразків пелет, виготовлених на основі мулових осадів стічних вод є можливість визначити всі складові рівнянь (7) і (8). За таких умов визначення ККД котла АОВА-20 при теплотехнічних випробуваннях можна скористатися методом прямого теплового балансу.

Випробування здійснювалося при роботі контура «водогрійний котел-система опалення» при усталеному режимі роботи котельного агрегату. На момент включення котла в роботу температура води на вході у котел була  $t_{н1} = 8$  °С, а при випробуванні вона підвищилася до  $t_{н2} = 55$  °С. Вимірювання температури під час проведення випробувань проводилося з використанням пірометра testo 830 T1, оснащеного 1-точковим лазером.

Насос Sprut GPD 32-8S для циркуляції води у контурі «водогрійний котел-система опалення» забезпечував витрату 0,5 м³/год. За три години витрата води склала 1,5 м³. Для умов, у яких проводилися випробування, можна вважати, система опалення виконувала функцію бойлера, і тому у рівнянні (7) можна прийняти:  $t_{вх} = t_{н1} = 8$  °С і  $t_{вх} = t_{н2} = 55$  °С. Тоді визначена згідно рівняння (7) корисна теплота  $Q_1 = 2,92 \cdot 10^5$  кДж.

За час роботи котла було спалено 19 кг композитних біопаливних пелет, виготовлених на основі мулових осадів. Розрахунки нижчої теплоти згоряння наданих композитних біопаливних пелет  $Q_{н}^p$  виконувалися за складом, наданим ОКВП «Дніпро-Кіровоград». Розрахована за формулою Менделєєва [8, 9]  $Q_{н}^p$  пелет склала 18 МДж/кг.

Визначений за рівнянням (8) ККД котла при теплотехнічних випробуваннях в режимі спалювання композитних біопаливних пелет, виготовлених на основі мулових осадів стічних вод, дорівнював 85%.

Основні результати теплотехнічних випробуваннях водогрійного котельного агрегату АОВА-20 в режимі спалювання композитних біопаливних пелет, виготовлених на основі мулових осадів стічних вод, приведено у таблиці 1.

Таблиця 1

**Основні результати теплотехнічних випробуваннях водогрійного котельного агрегату АОВА-20**

| №                         | Найменування   | Од. виміров. | Величина |
|---------------------------|--|--------------|----------|
| 1                         | Котельний агрегат АОВА:  |              | 1        |
|                           | Номінальна теплова потужність  | кВт          | 20       |
|                           | Оптимальна витрата води  | м³/год       | 0,5      |
|                           | Максимальна допустима температура води на виході, $T_{max}$  | °С           | 90       |
| 2                         | Композитні біопаливні пелети, що спалюються:   |              |          |
|                           | Маса, $M_n$  | Кг           | 19       |
|                           | Склад:   |              |          |
| Мулові осадки стічних вод | %  | 80           |          |
| Лушпиння соняшника        | %  | 20           |          |
| 3                         | Час роботи котла при спалюванні пелет масою $M_n$ в усталеному режимі, $\tau$  | год          | 3        |
| 4                         | Підігрів води у контурі циркуляції «водогрійний котел-система опалення» при випробуваннях: $\Delta t_{min} = t_{н2} (55 \text{ C}) - t_{н1} (8 \text{ C})$ | °С           | 47       |
| 5                         | Кількість води, підігрітої у котлі при її циркуляції протягом часу випробувань, $t_v$  | кг           | 1492     |
| 6                         | Нижча теплота згоряння наданого палива, $Q_{н}^p$  | МДж          | 18       |
| 7                         | Корисна теплота $Q_1$  | МДж          | 292      |
| 8                         | Наявна теплота, виділена при спалюванні палива, $Q_n$  | МДж          | 342      |
| 9                         | ККД котла при теплотехнічних випробуваннях в режимі спалювання композитних біопаливних пелет,  | %            | 85       |

**Висновки**

Розроблено методику проведення теплотехнічних випробувань водогрійного котельного агрегату АОВА-20 в режимі спалювання композитних біопаливних пелет на основі осадів стічних вод.

Для оцінки ефективності котельного агрегату в режимі спалювання біопаливних пелет ККД доцільно визначати за методом прямого теплового балансу.

Розроблено методику визначення ККД котельного з використанням контура «водогрійний котел-система опалення».

За результатами проведення теплотехнічних випробувань водогрійного котельного агрегату АОВА-20 в режимі спалювання композитних біопаливних пелет складом: 80% мулові осади стічних вод + 20% лушпиння соняшника на основі методу прямого теплового балансу визначено, що коефіцієнт його корисної дії дорівнює 85%.

### Список використаної літератури

1. Кравченко В. І., Білоус Ю. В., Кравченко В. П. Створення та обґрунтування композитного палива на основі осаду стічних вод. *Технічні науки*. Херсон: ХДАЕУ, 2023. Вип. 3. С. 88–94. URL: <http://journals.ksauniv.ks.ua/index.php/tech/article/view/403>
2. Кравченко В. І. Виготовлення та експериментальна оцінка біопалива на основі осадів стічних вод для одержання теплової енергії та будівельного матеріалу. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2024. № 2 (89). С. 32–37. DOI: <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.2.4>
3. Malhozhata V., Mariush T. Production of solid biofuel from city sewage sludge. Technical and economic optimization. *Waste Management & Research*. 2015. Vol. 33(8). URL: <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/0734242X15588584>
4. Nordin A. Co-combustion of municipal sewage sludge and biomass in a grate fired boiler for phosphorus recovery in bottom ash. *Energies*. 2020. Vol. 13(7). Article 1708. DOI: <https://doi.org/10.3390/en13071708>
5. Каталог продукції заводу ТДВ «Дозавтомати». URL: <https://www.dozator.com.ua/products/kotel-aova-20>
6. Klymenko V., Kravchenko V., Koltun P., Nevdakha Yu., Zavodyannyi V. Evaluation of Technological Scenarios for Production of Composite Biofuels Based on Communal Waste. *Balancing Water-Energy-Food Security in the Era of Environmental Change*. 2025. P. 169–188. DOI: [10.4018/979-8-3693-5693-7](https://doi.org/10.4018/979-8-3693-5693-7)
7. Кравченко В. І. Виготовлення та експериментальна оцінка біопалива на основі осадів стічних вод для одержання теплової енергії та будівельного матеріалу. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2024. № 2 (89). С. 32–37. DOI: <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.2.4>
8. Клименко В. В., Невдаха Ю. А., Кравченко В. І. Застосування шнекового методу пресування водовмісної композитної сировини на основі мулових осадів стічних вод для виготовлення дослідно-промислової партії композиційних біопаливних пелет. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2025. Вип. 12, ч. 1. С. 195–205. URL: [https://mapica.kntu.kr.ua/pdf/12\(43\)\\_I/18.pdf](https://mapica.kntu.kr.ua/pdf/12(43)_I/18.pdf)
9. Le Minh Quan, Kamyab H., Yuzir A., Veeramuthu A. Review of the application of gasification and combustion technology and waste-to-energy technologies in sewage sludge treatment. *Fuel*. 2022. DOI: [10.1016/j.fuel.2022.123199](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123199)
10. Гелетуша Г. Г., Жовмір М. М., Олійник С. М., Радченко С. В. Особливості теплотехнічних випробувань водогрійних котлів з періодичним спалюванням цілих тюків соломи. *Промислова теплотехніка*. 2010. Т. 32, № 6. С. 45–51.
11. Степанов Д. В., Корженко Є. С., Боднар Л. А. Котельні установки промислових підприємств: навчальний посібник. Вінниця: ВНТУ, 2011. 120 с. URL: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/4912>
12. Котельні установки : навчальний посібник / С. Й. Ткаченко, Д. В. Степанов, Л. А. Боднар. Вінниця: ВНТУ, 2016. 185 с. URL: <https://ctor.com.ua/wp-content/uploads/2024/05/Електроний-підручник.pdf>

### References

1. Kravchenko, V. I., Bilous, Yu. V., & Kravchenko, V. P. (2023). *Stvorennia ta obgruntuvannia kompozytnoho palyva na osnovi osadu stichnykh vod* [Creation and justification of composite fuel based on sewage sludge]. *Tekhnichni nauky* [Technical Sciences], 3, 88–94. Retrieved from <http://journals.ksauniv.ks.ua/index.php/tech/article/view/403>
2. Kravchenko, V. I. (2024). *Vyhotovlennia ta eksperymentalna otsinka biopalyva na osnovi osadiv stichnykh vod dlia oderzhannia teplovoi enerhii ta budivelnoho materialu* [Production and experimental evaluation of biofuel based on sewage sludge for thermal energy and building material]. *Visnyk Khersonskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu* [Bulletin of Kherson National Technical University], 2(89), 32–37. <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.2.4>
3. Malhozhata, V., & Mariush, T. (2015). Production of solid biofuel from city sewage sludge: Technical and economic optimization. *Waste Management & Research*, 33(8). <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/0734242X15588584>
4. Nordin, A. (2020). Co-combustion of municipal sewage sludge and biomass in a grate fired boiler for phosphorus recovery in bottom ash. *Energies*, 13(7), 1708. <https://doi.org/10.3390/en13071708>
5. Dozavtomaty Plant. (n.d.). *Product catalog*. Retrieved from <https://www.dozator.com.ua/products/kotel-aova-20>
6. Klymenko, V., Kravchenko, V., Koltun, P., Nevdakha, Yu., & Zavodyannyi, V. (2025). Evaluation of technological scenarios for production of composite biofuels based on communal waste. In *Balancing Water-Energy-Food Security in the Era of Environmental Change* (pp. 169–188). IGI Global. <https://doi.org/10.4018/979-8-3693-5693-7>
7. Kravchenko, V. I. (2024). *Vyhotovlennia ta eksperymentalna otsinka biopalyva na osnovi osadiv stichnykh vod dlia oderzhannia teplovoi enerhii ta budivelnoho materialu* [Production and experimental evaluation of biofuel based on

sewage sludge for thermal energy and building material]. *Visnyk Khersonskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu* [Bulletin of Kherson National Technical University], 2(89), 32–37. <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.2.4>

8. Klymenko, V. V., Nevdakha, Yu. A., & Kravchenko, V. I. (2025). *Zastosuvannia shnekovoho metodu presuvannia vodovmisnoi kompozytnoi syrovyny na osnovi mulovykh osadiv stichnykh vod dlia vyhotovlennia doslidno-promyslovoi partii kompozytsiinykh biopalyvnykh pelet* [Application of screw pressing method for water-containing composite raw materials based on sewage sludge to produce a pilot batch of composite biofuel pellets]. *Tsentrlnoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky* [Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences], 12(1), 195–205. [https://mapiea.kntu.kr.ua/pdf/12\(43\)\\_I/18.pdf](https://mapiea.kntu.kr.ua/pdf/12(43)_I/18.pdf)

9. Le Minh Quan, Kamyab, H., Yuzir, A., & Veeramuthu, A. (2022). Review of the application of gasification and combustion technology and waste-to-energy technologies in sewage sludge treatment. *Fuel*. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123199>

10. Heletukha, H. H., Zhovmir, M. M., Oliinyk, Ye. M., & Radchenko, S. V. (2010). *Osoblyvosti teplotekhnichnykh vyprobuvan vodohriinykh kotliv z periodychnym spalniuvanniam tsilykh tiukiv solomy* [Features of thermal testing of hot-water boilers with periodic combustion of whole straw bales]. *Promyslova teplotekhnika* [Industrial Heat Engineering], 32(6), 45–51.

11. Stepanov, D. V., Korzhenko, Ye. S., & Bodnar, L. A. (2011). *Kotelni ustanovky promyslovykh pidpriemstv: Navchalnyi posibnyk* [Boiler installations of industrial enterprises: Textbook]. Vinnytsia: VNTU. Retrieved from <https://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/4912>

12. Tkachenko, S. Y., Stepanov, D. V., & Bodnar, L. A. (2016). *Kotelni ustanovky: Navchalnyi posibnyk* [Boiler installations: Textbook]. Vinnytsia: VNTU. Retrieved from <https://ctor.com.ua/wp-content/uploads/2024/05/Електро-ний-підручник.pdf>

*Дата першого надходження рукопису до видання: 20.11.2025*  
*Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 17.12.2025*  
*Дата публікації: 31.12.2025*