УДК 628.47:681.5:504.06 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.2.22

В. М. КОМУСІЙ
аспірант кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
ORCID: 0009-0009-9530-0535

Л. І. ФЕШАНИЧ
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
ORCID: 0000-0002-5156-2199

КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ СПАЛЮВАННЯ ТВЕРДИХ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ У ПРОМИСЛОВІЙ ПЕЧІ

Проблема утилізації твердих побутових відходів (ТПВ) є однією з найактуальніших в Україні через значні обсяги їх накопичення на звалищах (понад 10 млн тонн щороку), низький рівень переробки (5–7 %) та екологічні загрози, такі як викиди метану, забруднення ґрунтових вод і втрата земельних ресурсів. У контексті війни та атак на енергетичну інфраструктуру України спалювання ТПВ із виробництвом енергії розглядається як перспективне альтернативне джерело енергії, що дозволяє зменшувати обсяги відходів до 90 % та генерувати тепло чи електрику. Однак процес спалювання потребує точного керування для мінімізації викидів оксидів азоту (NO_x), *вуглекислого газу* (CO) *та інших токсичних сполук, що є викликом через змінний склад ТПВ (вологість 20–40 %, органічний вміст 50–70 %). Метою цього дослідження є вдосконалення процесу спалювання ТПВ шляхом інтеграції систем вторинного повітря та рециркуляції димових газів у складі комп'ютерно-інтегрованої системи керування (КІСК). У статті детально описано конструкцію промислової печі, яка включає колосникову решітку, камеру допалювання, бункер із дозуючими засувками, а також системи вторинного повітря (вентилятор, форсунки, засувки) та рециркуляції димових газів (вентилятор, теплообмінник, фільтр). КІСК забезпечує адаптивне регулювання параметрів горіння (температура 850–1000 °C, вміст кисню 6–8 %) на основі даних датчиків температури, кисню,* CO *та* NO_x. *Літературний аналіз підтверджує, що вторинне повітря знижує концентрацію* CO *на 15 %, а рециркуляція димових газів зменшує викиди* NO_x *на 10–15 % і економить 8–10 % витрат на очищення газів. Перспективи дослідження включають експериментальну перевірку ефективності запропонованого підходу, впровадження автоматизації через Інтернет речей (IoT) та інтеграцію з технологіями вловлювання* CO_2 *для підвищення екологічної безпеки та енергоефективності.*

Ключові слова: *тверді побутові відходи, спалювання, комп'ютерно-інтегрована система керування, вторинне повітря, рециркуляція димових газів, енергоефективність, викиди* NO_x, *датчики.*

V. M. KOMUSII
Postgraduate Student at the Department of Automation
and Computer-Integrated Technologies
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
ORCID: 0009-0009-9530-0535

L. I. FESHANYCH
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Automation
and Computer-Integrated Technologies
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
ORCID: 0000-0002-5156-2199

COMPUTER-INTEGRATED SYSTEM FOR CONTROLLING THE COMBUSTION PROCESS OF SOLID HOUSEHOLD WASTE IN AN INDUSTRIAL FURNACE

The issue of municipal solid waste (MSW) disposal remains critical in Ukraine, where over 10 million tons of waste are generated annually, with only 5–7 % recycled, leading to significant landfill accumulation. This poses environmental threats, including methane emissions, groundwater contamination, and land resource depletion. Amid the ongoing war and attacks on Ukraine's energy infrastructure, MSW incineration with energy recovery emerges as a vital alternative energy source, capable of reducing waste volume by up to 90 % while generating heat or electricity. However, the incineration process requires precise control to minimize emissions of nitrogen oxides (NO_x), *carbon monoxide* (CO), *and other toxic compounds, particularly due to the variable composition of MSW (moisture content 20–40 %, organic content*

50–70 %). This study aims to enhance MSW incineration by integrating secondary air and flue gas recirculation systems within a computer-integrated control system (CICS). The paper provides a detailed description of the industrial furnace design, which includes a grate, an afterburning chamber, a waste bunker with dosing gates, and systems for secondary air (fan, nozzles, valves) and flue gas recirculation (fan, heat exchanger, filter). The CICS enables adaptive regulation of combustion parameters (temperature 850–1000 °C, oxygen content 6–8 %) based on real-time data from temperature, oxygen, CO, *and* NO_x *sensors. Literature analysis confirms that secondary air reduces* CO *concentrations by 15 %, while flue gas recirculation decreases* NO_x *emissions by 10–15 % and saves 8–10 % of gas cleaning costs. Future research directions include experimental validation of the proposed approach, implementation of IoT-based automation, and integration with* CO_2 *capture technologies to enhance environmental safety and energy efficiency.*

Key words: *municipal solid waste, incineration, computer-integrated control system, secondary air, flue gas recirculation, energy efficiency, NOx emissions, sensors.*

Постановка проблеми

Проблема утилізації твердих побутових відходів (ТПВ) є однією з найгостріших у сучасному світі, особливо в Україні, де щороку утворюється понад 10 мільйонів тонн відходів, із яких лише 5–7 % переробляється, а решта накопичується на звалищах [1]. Такі звалища створюють екологічні загрози, зокрема через викиди метану, забруднення ґрунтових вод і втрату земельних ресурсів. В Україні сміттєспалювальна галузь перебуває на початковому етапі розвитку: одним із діючих об'єктів є завод «Енергія» у Києві, який переробляє близько 25 % ТПВ міста і наразі проходить модернізацію для підвищення ефективності та відповідності сучасним екологічним стандартам. Крім того, в Україні функціонують інші установки, зокрема дві мобільні сміттєспалювальні печі в Харкові та одна стаціонарна в Харківській області [2]. Відповідно до Національної стратегії поводження з відходами до 2030 року, планується будівництво нових сміттєспалювальних заводів, що дозволить збільшити частку термічної переробки ТПВ до 10 % [3].

Спалювання ТПВ у промислових печах є перспективним рішенням, яке дозволяє зменшувати обсяги відходів до 90 % і виробляти енергію у вигляді тепла чи електрики [4]. Проте цей метод має свої виклики, пов'язані з необхідністю точного контролю параметрів горіння для зниження екологічного впливу. Основними проблемами є:

- Нестабільність горіння через змінний склад ТПВ (вологість 20–40 %, органічний вміст 50–70 %).
- Високі викиди NOx і CO через надлишок або нестачу кисню в зоні горіння.
- Недостатня ефективність традиційних систем керування, які не адаптуються до змін умов.
- Високі витрати на очищення димових газів через неефективне допалювання летких речовин.

Тема зниження викидів NO_x є особливо актуальною в Україні, оскільки ці сполуки негативно впливають на якість повітря та здоров'я населення, а також потребують відповідності національних стандартів до європейських екологічних норм [5]. Для вирішення цих проблем необхідні сучасні технології, зокрема інтеграція систем вторинного повітря та рециркуляції димових газів у складі комп'ютерно-інтегрованих систем керування (КІСК), які дозволяють адаптивно регулювати параметри процесу в реальному часі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Дослідження у сфері спалювання ТПВ активно проводяться з акцентом на зниження екологічного впливу та підвищення енергоефективності. Європейське бюро з інтегрованого запобігання та контролю забруднень (EIPPCB) у своєму звіті зазначає, що найкращі доступні технології (BAT) для спалювання відходів передбачають підтримання температури горіння на рівні 850–1000 °C для мінімізації утворення діоксинів і NO_x [6]. Зокрема, діоксини утворюються при температурах нижче 850 °C, а надлишок кисню може спричинити зростання викидів NO_x [7].

Традиційні системи спалювання часто стикаються з проблемою змінного складу ТПВ, що призводить до нестабільного горіння та підвищених викидів. Наприклад, Chen et al. (2019) показали, що неконтрольоване горіння може збільшувати викиди NO_x на 20–30 % через надлишок кисню в зоні горіння [8]. Для вирішення цієї проблеми застосовуються системи вторинного повітря, які створюють турбулентність і забезпечують допалювання летких речовин. Згідно з дослідженням Li et al. (2020), вторинне повітря може знижувати концентрацію CO на 15 % за рахунок кращого змішування [9].

Системи рециркуляції димових газів також відіграють важливу роль у зниженні викидів. Yang et al. (2018) зазначають, що рециркуляція дозволяє зменшувати концентрацію NOx на 10–15 % шляхом зниження температури горіння та зменшення потоку газів через димохід [10]. Zhang et al. (2021) додають, що рециркуляція може знижувати витрати на очищення газів на 8–10 % за рахунок повторного використання тепла [11].

Інтеграція таких систем із комп'ютерно-інтегрованими системами керування є відносно новим напрямом. Дослідження Дубового та інших авторів підкреслюють, що КІСК дозволяють адаптивно регулювати параметри процесу в реальному часі, підвищуючи стабільність і ефективність [12]. Wang et al. (2022) показали, що використання алгоритмів машинного навчання для прогнозування складу ТПВ може покращувати точність регулювання на 12 % [13]. Проте бракує комплексних досліджень, які б поєднували системи вторинного повітря, рециркуляцію димових газів і КІСК у єдиному підході, що й стало основою цього дослідження.

Формулювання мети дослідження

Метою дослідження є удосконалення процесу спалювання твердих побутових відходів у промисловій печі шляхом інтеграції систем вторинного повітря та рециркуляції димових газів у складі комп'ютерно-інтегрованої системи керування (КІСК). Завдання дослідження:

- Проаналізувати сучасні підходи до спалювання ТПВ та їхні екологічні й енергетичні характеристики.
- Розробити алгоритм керування потоками повітря та димових газів із використанням КІСК.
- Детально описати конструкцію систем вторинного повітря та рециркуляції, їхню взаємодію та роль у процесі.
- Визначити якісні показники (температура, викиди, ККД) для контролю за допомогою датчиків.
- Оцінити потенціал запропонованого підходу на основі літературних даних і визначити перспективи експериментальної перевірки.

Викладення основного матеріалу дослідження

Промислова піч для спалювання ТПВ складається з кількох ключових елементів, які забезпечують ефективну утилізацію відходів і виробництво енергії. Основою печі є колосникова решітка, виготовлена з жаростійкої сталі, здатної витримувати високі температури. Ця решітка слугує для розміщення відходів і забезпечення їхнього рівномірного згоряння. Над решіткою розташована камера допалювання, призначена для повного згоряння летких речовин, що виділяються під час горіння, щоб зменшити утворення токсичних сполук. Бункер для ТПВ оснащений дозуючим пристроєм із шиберними засувками, які дозволяють точно регулювати подачу відходів, забезпечуючи стабільність процесу.

Процес спалювання розпочинається з подачі ТПВ із бункера на колосникову решітку. Завдяки шиберним засувкам відходи завантажуються рівномірно, що запобігає перевантаженню печі та утворенню недогарків. У зоні горіння відходи згорають при температурах 850–1000 °C. Первинне повітря подається знизу через решітку, забезпечуючи інтенсивне згоряння органічних компонентів. Первинний вентилятор підтримує необхідний потік повітря для горіння. Тепло, що виділяється, передається на теплообмінні поверхні, де вода нагрівається, утворюючи пару для приводу турбіни, що генерує енергію [6].

Для забезпечення повного згоряння та зниження викидів у печі передбачено кілька етапів: згоряння (CSP), допалювання летких речовин у камері допалювання, очищення димових газів (FGT) і допоміжні процеси (BOP). Кожен із цих етапів потребує точного регулювання параметрів, таких як температура, вміст кисню та потоки повітря, що досягається за допомогою КІСК [12].

Система вторинного повітря є ключовим елементом для забезпечення повного допалювання летких речовин і зниження викидів токсичних сполук. Вона включає вентилятор потужністю 10 кВт із продуктивністю 3000 м^3/год, повітроводи діаметром 200 мм, чотири розподільні засувки та інжекційні форсунки. Засувки мають діаметр 150 мм і регулюються електроприводом із точністю 5 %. Форсунки виготовлені з нержавіючої сталі, мають діаметр 20 мм і розташовані на сторонах бункера та котла в камері допалювання (по 4 форсунки з кожного боку).

Вторинне повітря береться з котельні, де температура становить 30–40 °C, і змішується з парами з екстракторів золи (температура 60 °C) та рециркульованими димовими газами (температура 150 °C після охолодження). Змішане повітря подається через форсунки з потоком 1–1.5 м^3/кг відходів, створюючи турбулентність у печі, що покращує змішування димових газів із киснем. Спеціальна геометрія форсунок із кутом нахилу 45° генерує вихровий потік, що сприяє повному допалюванню летких речовин і зменшує утворення діоксинів і фуранів [9].

Система рециркуляції димових газів доповнює процес, повертаючи частину димових газів назад у піч для повторного використання. Вона складається з вентилятора потужністю 12 кВт із продуктивністю 4000 м^3/год, повітроводів діаметром 250 мм і вимірювальних інструментів. Димові гази охолоджуються до 150 °C у теплообміннику та очищаються від пилу в циклонному фільтрі перед поверненням у піч.

У разі відмови вентилятора з індукованою тягою (потужність 20 кВт, продуктивність 6000 м^3/год) вентилятор рециркуляції автоматично зупиняється завдяки сигналу від датчика тиску, інтегрованого в КІСК. Це забезпечує безпеку процесу та запобігає аварійним ситуаціям [12]. Рециркульовані гази стають частиною змішаного повітря, що подається через систему вторинного повітря, створюючи замкнутий цикл, який оптимізує горіння та знижує екологічний вплив.

На схемі зображено основні компоненти системи: бункер із шиберними засувками, колосникову решітку, зону горіння, камеру допалювання, систему вторинного повітря (вентилятор, засувки, форсунки), систему рециркуляції димових газів (вентилятор, повітроводи), теплообмінник. Датчики температури позначені в зоні горіння та камері допалювання, датчики O_2 і NO_x – у потоці димових газів, витратоміри – на вході первинного та вторинного повітря.

Алгоритм керування, інтегрований у КІСК, розроблений для адаптивного регулювання процесу спалювання ТПВ і базується на даних сенсорів. Алгоритм складається з двох основних етапів:

- Збір даних: Дані з датчиків температури, O_2, CO, NOx, тиску та витратомірів надходять у КІСК у реальному часі. Це дозволяє системі постійно відстежувати стан процесу та реагувати на зміни умов, таких як зміна складу ТПВ.

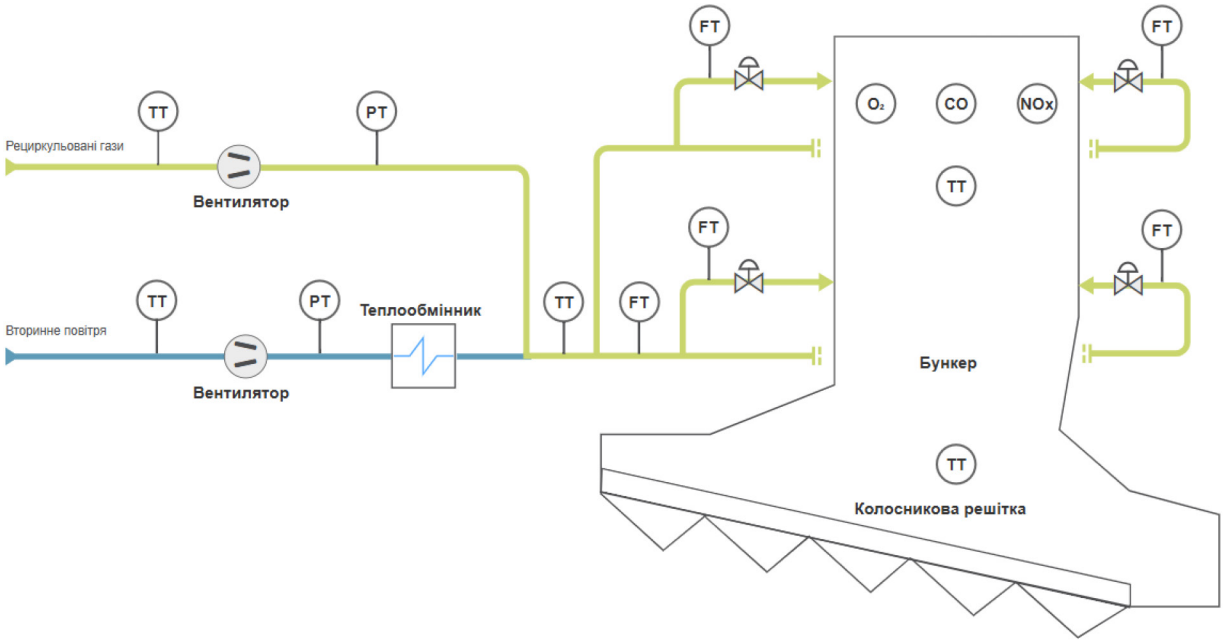

Рис. 1. Схема системи спалювання ТПВ

• Адаптивне регулювання: На основі аналізу даних алгоритм розраховує заданий потік змішаного повітря та коригує положення засувок (з точністю 5 %) для підтримання оптимальних умов горіння (температура 850–1000 °C, вміст O_2 6–8 %) [12]. Наприклад, якщо датчики O_2 показують надлишок кисню (понад 8 %), система зменшує подачу вторинного повітря, щоб уникнути зростання викидів NO_x.

Алгоритм також враховує безпекові аспекти: у разі відмови вентилятора з індукованою тягою КІСК автоматично зупиняє вентилятор рециркуляції, що запобігає аварійним ситуаціям. Такий підхід дозволяє системі адаптуватися до змінного складу ТПВ і підтримувати стабільність процесу, що є важливим для зниження викидів і підвищення енергоефективності.

Потенціал запропонованого підходу

На основі літературних даних запропонований підхід має значний потенціал для покращення процесу спалювання ТПВ. Згідно з дослідженням Li et al. (2020), використання вторинного повітря з вихровим потоком може знижувати концентрацію CO на 15 % за рахунок повного допалювання летких речовин [9]. Yang et al. (2018) зазначають, що рециркуляція димових газів здатна зменшувати викиди NOx на 10–15 % шляхом зниження температури горіння та зменшення потоку газів через димохід [10]. Zhang et al. (2021) додають, що рециркуляція може економити 8–10 % витрат на очищення димових газів за рахунок повторного використання тепла [11].

Інтеграція систем вторинного повітря та рециркуляції в КІСК дозволяє досягати синергетичного ефекту:

• Турбулентність, створена вихровим потоком, покращує змішування димових газів із киснем, що сприяє повному згорянню.

• Рециркуляція димових газів знижує викиди NO_x і оптимізує використання тепла.

• Адаптивне регулювання за допомогою КІСК забезпечує стабільність процесу незалежно від змін складу ТПВ.

Висновки

У цьому дослідженні було розглянуто можливості вдосконалення процесу спалювання твердих побутових відходів (ТПВ) у промисловій печі шляхом інтеграції сучасних технологій, таких як системи вторинного повітря та рециркуляції димових газів, у складі комп'ютерно-інтегрованої системи керування (КІСК). Проведений аналіз літератури показав, що ці системи дозволяють значно знизити викиди шкідливих речовин, зокрема NO_x і CO, а також підвищити енергоефективність процесу. Запропонований підхід базується на адаптивному регулюванні параметрів горіння в реальному часі, що є особливо важливим у контексті змінного складу ТПВ, який часто створює виклики для традиційних систем спалювання.

Описана конструкція печі, системи вторинного повітря та рециркуляції димових газів, а також алгоритм керування в КІСК демонструють потенціал для створення синергетичного ефекту. Вихровий потік, створюваний вторинним повітрям, сприяє повному допалюванню летких речовин, тоді як рециркуляція газів допомагає зменшити температуру горіння і, відповідно, викиди NO_x. Використання датчиків для моніторингу температури, вмісту кисню, CO та NO_x забезпечує точний контроль процесу, що є критично важливим для дотримання екологічних стандартів, особливо в умовах України, де екологічні норми стають дедалі суворішими в рамках гармонізації з європейськими вимогами

Список використаної літератури

1. ECOBUSINESS. (2017). Спалювання відходів: вигоди і обмеження [Waste incineration: Benefits and limitations]. Retrieved from https://ecolog-ua.com/articles/spalyuvannya-vidhodiv-vygody-i-obmezhennya

2. DLF Attorneys-at-Law. (n.d.). Ukrainian national waste management strategy. Retrieved from https://dlf.ua/en/ukrainian-national-waste-management-strategy/

3. Lexology. (n.d.). Waste-to-energy: How Ukraine can generate heat and electricity from municipal waste. Retrieved from https://www.lexology.com/library/detail.aspx?g=2b7e7d8d-1e5c-4f5f-9b5f-7e9f2c8e8c2e

4. Department for Environment, Food & Rural Affairs (DEFRA). (2013). Incineration of municipal solid waste. UK Government.

5. Верховна Рада України. (n.d.). Закон України «Про охорону атмосферного повітря» [Law of Ukraine "On Air Protection"]. Retrieved from https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2707-12

6. European Integrated Pollution Prevention and Control Bureau (EIPPCB). (2006). Best available techniques (BAT) reference document for waste incineration. Retrieved from https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2020-03/superseded_wi_bref_0806_0.pdf

7. Niessen, W. R. (2010). Combustion and incineration processes: Applications in environmental engineering. CRC Press.

8. Chen, D., Yin, L., & Wang, H. (2019). Challenges in municipal solid waste incineration: A review. Waste Management, 92, 45–56. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.04.032

9. Li, J., Zhang, X., & Chen, L. (2020). Optimization of secondary air distribution in municipal solid waste incineration for emission reduction. Energy Reports, 6, 451–460. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.02.015

10. Yang, Y., Wang, Y., & Zhang, J. (2018). Effects of flue gas recirculation on NOx emissions in waste incineration systems. Journal of Cleaner Production, 185, 123–130. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.045

11. Zhang, Q., Li, Y., & Xu, J. (2021). Energy recovery and emission reduction through flue gas recirculation in waste incineration. Renewable Energy, 168, 789–799. https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.12.085

12. Дубовой, В. М. (Ред.). (2018). Промислові комп'ютерно-інтегровані системи: принципи проектування та експлуатації [Industrial computer-integrated systems: Design and operation principles]. Київ : НТУУ «КПІ».

13. Wang, H., Liu, X., & Zhang, S. (2022). Machine learning applications in waste incineration: A review. Environmental Science and Pollution Research, 29(15), 21034–21045. https://doi.org/10.1007/s11356-021-17856-3

References

1. ECOBUSINESS. (2017). Waste incineration: Benefits and limitations. Retrieved from https://ecolog-ua.com/articles/spalyuvannya-vidhodiv-vygody-i-obmezhennya

2. DLF Attorneys-at-Law. (n.d.). Ukrainian national waste management strategy. Retrieved from https://dlf.ua/en/ukrainian-national-waste-management-strategy/

3. Lexology. (n.d.). Waste-to-energy: How Ukraine can generate heat and electricity from municipal waste. Retrieved from https://www.lexology.com/library/detail.aspx?g=2b7e7d8d-1e5c-4f5f-9b5f-7e9f2c8e8c2e

4. Department for Environment, Food & Rural Affairs (DEFRA). (2013). Incineration of municipal solid waste. UK Government.

5. Verkhovna Rada of Ukraine. (n.d.). Law of Ukraine "On Air Protection". Retrieved from https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2707-12

6. European Integrated Pollution Prevention and Control Bureau (EIPPCB). (2006). Best available techniques (BAT) reference document for waste incineration. Retrieved from https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2020-03/superseded_wi_bref_0806_0.pdf

7. Niessen, W. R. (2010). Combustion and incineration processes: Applications in environmental engineering. CRC Press.

8. Chen, D., Yin, L., & Wang, H. (2019). Challenges in municipal solid waste incineration: A review. Waste Management, 92, 45–56. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.04.032

9. Li, J., Zhang, X., & Chen, L. (2020). Optimization of secondary air distribution in municipal solid waste incineration for emission reduction. Energy Reports, 6, 451–460. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.02.015

10. Yang, Y., Wang, Y., & Zhang, J. (2018). Effects of flue gas recirculation on NOx emissions in waste incineration systems. Journal of Cleaner Production, 185, 123–130. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.045

11. Zhang, Q., Li, Y., & Xu, J. (2021). Energy recovery and emission reduction through flue gas recirculation in waste incineration. Renewable Energy, 168, 789–799. https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.12.085

12. Dubovoy, V. M. (Ed.). (2018). Industrial computer-integrated systems: Design and operation principles. Kyiv : NTUU "KPI".

13. Wang, H., Liu, X., & Zhang, S. (2022). Machine learning applications in waste incineration: A review. Environmental Science and Pollution Research, 29(15), 21034–21045. https://doi.org/10.1007/s11356-021-17856-3