

Національна академія наук України  
Інститут технічної теплофізики

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**Жученко Іван Михайлович**

УДК 536.24:621.184.5

## **ДИСЕРТАЦІЯ**

# **ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ТЕПЛОВИХ МЕТОДІВ ЗАХИСТУ ГАЗОВІДВІДНИХ ТРАКТІВ ДЛЯ УСТАНОВОК СПАЛЮВАННЯ ТВЕРДИХ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ З СИСТЕМАМИ ТЕПЛОУТИЛІЗАЦІЇ**

144 – Теплоенергетика

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії в галузі знань  
14 електрична інженерія

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,  
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

І. М. Жученко

Науковий керівник – Фіалко Наталія Михайлівна, доктор технічних наук,  
професор, чл.-кор. НАН України

Київ – 2026

## **АНОТАЦІЯ**

*Жученко І.М.* ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ТЕПЛОВИХ МЕТОДІВ ЗАХИСТУ ГАЗОВІДВІДНИХ ТРАКТІВ ДЛЯ УСТАНОВОК СПАЛЮВАННЯ ТВЕРДИХ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ З СИСТЕМАМИ ТЕПЛОУТИЛІЗАЦІЇ – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії в галузі знань 14 – Електрична інженерія за 144 – Теплоенергетика. – Інститут технічної теплофізики НАН України, Київ, 2026.

Дисертаційна робота присвячена дослідженню умов застосування теплових методів запобігання конденсатоутворенню у газовідвідних трактах сміттєспалювальних установок з системами утилізації теплоти їх відхідних газів.

**У вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету і завдання досліджень, наведено наукову новизну та практичну цінність одержаних результатів, визначено особистий внесок здобувача, представлено інформацію щодо апробації, структури і обсягу дисертації.

**Перший розділ** дисертації присвячено аналізу сучасного стану проблеми, що розглядається. Висвітлюються особливості використання скидної теплоти в технологіях термічного знешкодження побутових відходів. Аналізуються шляхи вирішення проблеми експлуатаційної надійності газовідвідних трактів паливоспоживальних установок.

На основі виконаного аналізу стану розглянутої проблеми сформульовано мету та основні завдання, що вирішуються у дисертаційній роботі.

**У другому розділі** висвітлюються особливості застосування теплових методів запобігання конденсатоутворенню в газовідвідних трактах для їх антикорозійного захисту при використанні теплоутилізаційних технологій у сміттєспалювальних установках. Розглядається специфіка застосовуваної системи теплоутилізації теплових викидів. Наводяться характеристики теплових методів відведення конденсатоутворення у газовідвідних трактах

енергоустановок. Представлена методика розрахункових досліджень тепловологісних режимів димових газів у газовідвідних каналах. Наводяться вихідні дані для проведення розрахункових досліджень.

**Третій розділ** присвячено аналізу тепловологісного режиму в димових трубах за умов застосування теплових методів тепловологісної обробки димових газів після рекуперації для відвернення випадення конденсату в газовідвідних трактах.

Щодо методу байпасування (пропускання частини димових газів повз теплоутилізатор) встановлено залежність тепловологісного режиму у газовідвідному тракті від частки байпасування відхідних газів їх вологовмісту перед теплоутилізатором і температури довкілля. Показано, що енергетичні витрати на реалізацію методу є значними і за умови частки байпасування 50% перевищують половину утилізованої теплоти.

Одержано дані щодо застосування методу підігрівання димових газів після системи теплоутилізації в теплообміннику газопідігрівачі. Визначено, що максимальні витрати енергії на здійснення методу не перевищують 25% від теплоти, одержаної в процесі утилізації тепла димових газів.

Стосовно методу підмішування до димових газів після теплоутилізатора частки повітря, нагрітого у повітропідігрівачі, встановлено, що витрати на реалізацію методу для умов, які розглядалися, становлять близько 10% від утилізованої теплоти.

Виконано оцінку ефективності методу зменшення втрат теплоти з поверхні корпусу димової труби в навколишнє середовище шляхом її теплоізоляції або розміщення газовідвідного ствола в широкому діапазоні зміни навантажень сміттєспалювальної установки і вологовмісту димових газів перед теплоутилізаційною системою. Встановлено, що запобігання конденсатуутворенню в димовій трубі реалізується лише за від'ємних температур атмосферного повітря для усіх розглянутих вологовмістів димових газів.

Наводяться результати порівняльного аналізу досліджуваних методів запобігання конденсатоутворенню за величиною витрат на їх реалізацію.

У четвертому розділі висвітлюються результати виконаних досліджень тепловологісних режимів в димових трубах у разі застосування комплексу теплових методів для антикорозійного захисту газовідвідних трактів. Наводяться результати аналізу впливу на тепловологісний стан в димових трубах теплового методу зменшення втрат теплоти в навколишнє середовище шляхом теплоізоляції димової труби або розміщення в ній вставного газовідвідного ствола. Представлено дані щодо встановлення закономірностей зміни тепловологісних характеристик в гирлі теплоізольованої димової труби при використанні повітряного методу. Розглядаються результати досліджень з визначення показників ефективності повітряного методу для труб зі вставним газовідвідним стволом для відвернення в них випадення конденсату. За результатами виконаних досліджень встановлено, що застосування комплексу теплових методів запобігання конденсатоутворенню за величиною втрат теплоти є суттєво ефективнішим у порівнянні із застосуванням одного з теплових методів. Сформульовано принципові положення щодо застосування теплових методів запобігання конденсатоутворенню в димових трубах сміттєспалювальних установок.

#### **Наукова новизна отриманих результатів:**

1. Для умов застосування комбінованої системи утилізації димових газів установок спалювання ТПВ встановлено закономірності зміни тепловологісного стану димових газів в залежності від навантаження цих установок, температури та вологовмісту газів перед теплоутилізатором.
2. В широкому діапазоні зміни навантажень установки для спалювання ТПВ виконано оцінку ефективності методів тепловологісної обробки димових газів для відвернення конденсатоутворення у газовідвідних

трактах: пропускання димових газів повз теплоутилізаційну систему ТУ, підігрівання димових газів після ТУ у теплообміннику - газопідігрівачу, підмішування до охолоджених в ТУ димових газів частини повітря, нагрітого у повітрянагрівачі.

3. Одержано дані щодо ефективності застосування для запобігання конденсатоутворення в димових трубах установок спалювання ТПВ методів зменшення теплових втрат з поверхонь димових труб шляхом теплоізоляції корпусу труби або монтування в неї газовідвідного ствола.
4. Виконано порівняльний аналіз ефективності розглянутих теплових методів відвернення конденсатоутворення в газовідвідних трактах установок для спалювання ТПВ.
5. Обґрунтовано вибір комплексу теплових методів запобігання конденсатоутворенню в димових трубах установок для спалювання ТПВ, застосування яких забезпечує відсутність утворення конденсату в усіх режимах роботи установок.

**Практичне значення отриманих результатів.** Результати виконаних досліджень рекомендовані до використання при проектуванні нових установок спалювання ТПВ та для підвищення теплової ефективності та надійності установок, що перебувають в експлуатації.

Отримані наукові результати використовуються також в учбових процесах при підготовки відповідних фахівців.

**Ключові слова:** *тверді побутові відходи, сміттєспалювальні установки, відходи в енергію, теплоутилізаційні системи, захист газовідвідних трактів, теплові методи захисту трактів, повітряний метод, метод, метод нагріву димових газів, теплоізоляція, метод байпасування, димові гази, димова труба, тепловологісний режим, запобігання конденсатоутворенню, вихровий пальник, витий теплообмінник,*

теплогідравлічні процеси, опір теплопередачі, коефіцієнт теплопередачі, повітрянагрівач котельної установки.

### Список публікацій здобувача

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Shevchuk S., Zhuchenko I. Prevention of condensation in chimneys of waste incineration plants with waste heat recovery systems. *Theory and Building Practice* 2026; Volume 8, Number 1, Pp. 165-172. <https://doi.org/10.23939/jtbp2026.01.165>.

2. Фіалко, Н. М., & Жученко, І. М. (2026). Особливості застосування теплоутилізаційного устаткування в запилених газових потоках. *Енергетика і автоматика*, 1(1), 4-12. [https://doi.org/10.31548/energiya1\(83\).2026.004](https://doi.org/10.31548/energiya1(83).2026.004)

3. Фіалко Н.М., Навродська Р.О., Жученко І.М., Шевчук С.І., Гнедаш Г.О. Проблеми експлуатаційної надійності газовідвідних трактів установок спалювання твердих побутових відходів та шляхи їх вирішення. *Теплофізика та Теплоенергетика*, 2025, 47 (1), 7-18. <https://doi.org/10.31472/ttpe.1.2025.1>

4. Фіалко Н.М., Навродська Р.О., Жученко І.М., Шевчук С.І., Гнедаш Г.О. Забезпечення надійності димових труб сміттєспалювальних установок з системами утилізації скидної теплоти. *Теплофізика та Теплоенергетика*, 2025, 47 (3), 62-71. <https://doi.org/10.31472/ttpe.3.2025.6>

5. Фіалко Н.М., Навродська Р.О., Шевчук С.І., Жученко І.М., Гнедаш Г.О. Ефективність застосування методу байпасування для антикорозійного захисту газовідвідних трактів сміттєспалювального котла. *Міжнародний науковий журнал "Інтернаука"*, 2025, 2. <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2025-2-10728>

6. Фіалко Н.М., Навродська Р.О., Шевчук С. І., Жученко І. М., Гнедаш Г.О. Запобігання конденсатоутворенню в димовій трубі сміттєспалювального котла при застосуванні теплоутилізаційних технологій. *Міжнародний науковий журнал "Інтернаука"*, 2025, 3. <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2025-3-10835>

7. Фіалко Н.М., Навродська Р.О., Шевчук С.І., Жученко І.М., Гнедаш Г.О. Забезпечення антикорозійного захисту димової труби сміттєспалювального котла шляхом додавання нагрітого повітря. *Міжнародний науковий журнал "Інтернаука"*, 2025, 7. <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2025-7-11175>

**Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:**

1. Фіалко Н.М., Навродська Р.О., Жученко І.М., Шевчук С.І., Гнедаш Г.О. Байпасування димових газів як метод підвищення експлуатаційної надійності газовідвідних трактів установок спалювання твердих побутових відходів. Тези, LIV Всеукраїнська науково-технічна конференція факультету будівництва, цивільної та екологічної інженерії, 2025, ст. 1920-1922. <https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/view/904/1576/2888-1>

2. Фіалко Н. М., Навродська Р. О., Жученко І. М., Шевчук С. І., Гнедаш Г. О. Вплив запиленості продуктів згоряння на ефективність теплоутилізаційного устаткування сміттєспалювальних установок, XXXIV Міжнародна онлайн-конференція «Проблеми екології та експлуатації об'єктів енергетики», Збірник праць «Проблеми екології та експлуатації об'єктів енергетики» (С. 85 - 88). 2025, Київ : ІВЦ АЛКОН НАН. [http://ittf.kiev.ua/wp-content/uploads/2025/12/sbornik\\_2025\\_vse.pdf](http://ittf.kiev.ua/wp-content/uploads/2025/12/sbornik_2025_vse.pdf).

3. Fialko N. M., Navrodska R. O., Gnedash G. O., Shevchuk S. I., Zhuchenko I. M. The efficiency of use of a gas-heater and thermal insulation for anti-corrosion protection of the exhaust-ducts of waste incinerator boiler. Science in the modern world: innovations and challenges. Proceedings of the 8th International scientific and practical conference. Perfect Publishing. Toronto, Canada. 2025. Pp. 177-182. <https://sci-conf.com.ua/viii-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-science-in-the-modern-world-innovations-and-challenges-17-19-04-2025-toronto-kanada-arhiv/>

4. Fialko N. M., Navrodska R. O., Gnedash G. O., Shevchuk S. I., Zhuchenko I. M. Problems of operation of ecologically efficient gas-fired heating boilers. Scientific achievements of contemporary society. Proceedings of the 9th

International scientific and practical conference. Cognum Publishing House. London, United Kingdom. 2025. Pp. 118-123. <https://sci-conf.com.ua/ix-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-scientific-achievements-of-contemporary-society-4-6-04-2025-london-velikobritaniya-arhiv/>

5. І. М. Жученко. Методи зменшення викидів оксидів азоту на водогрійних котлах. Тези Інноваційні технології в будівництві. Вінниця, Україна, 2024, ст. 373-376.

<https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/view/869/1514/2811-1>

6. І. М. Жученко. Розвиток системи тепlopостачання, Тези ЛІІ Науково-технічна конференція факультету будівництва, цивільної та екологічної інженерії. Вінниця, Україна, 2023, ст. 1722-1724.

<https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/view/788/1373/2632-1>

## ABSTRACT

I.M. Zhuchenko FEATURES OF THE APPLICATION OF THERMAL METHODS FOR THE PROTECTION OF FLUE GAS DUCTS FOR MUNICIPAL SOLID WASTE INCINERATION PLANTS WITH HEAT RECOVERY SYSTEMS – Qualification scientific work in manuscript form. Thesis for the degree of Doctor of Philosophy in speciality 14 – Electrical Engineering, subfield 144 – Thermal Power Engineering. – Institute of Technical Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2026.

The thesis is devoted to the study of the conditions for the application of thermal methods to prevent condensation in the flue gas ducts of waste incineration plants equipped with systems for the utilisation of heat from their flue gases.

**The introduction** justifies the relevance of the thesis topic, formulates the aim and objectives of the research, outlines the scientific novelty and practical value of the results obtained, identifies the candidate's personal contribution, and provides information on the validation, structure and scope of the thesis.

**The first chapter** of the thesis is devoted to an analysis of the current state of the problem under consideration. It highlights the features of waste heat

utilisation in technologies for the thermal treatment of municipal solid waste. It analyses ways of addressing the issue of operational reliability of the flue gas ducts in fuel-consuming plants.

Based on the analysis of the current state of the problem under consideration, the aim and main objectives addressed in the thesis are formulated.

**The second chapter** highlights the specific features of applying thermal methods to prevent condensation formation in flue gas ducts for their anti-corrosion protection when using heat recovery technologies in waste incineration plants. The specific features of the applied waste heat recovery system are examined. The characteristics of thermal methods for preventing condensation in the flue gas ducts of power plants are presented. A methodology for computational studies of the thermal-humidity regimes of flue gases in flue gas ducts is presented. The initial data for conducting the computational studies are provided.

**The third chapter** is devoted to the analysis of the thermal-humidity regime in flue pipes under conditions where thermal methods of thermal-humidity treatment of flue gases are applied after heat recovery to prevent condensation in the flue gas ducts.

With regard to the bypass method (passing a portion of the flue gases past the heat recovery unit), the dependence of the thermal-humidity regime in the flue gas duct on the bypass fraction of the exhaust gases, their moisture content upstream of the heat recovery unit, and the ambient temperature has been established. It has been shown that the energy costs of implementing this method are significant and, with a bypass fraction of 50%, exceed half of the recovered heat.

Data have been obtained on the application of the method of preheating flue gases after the heat recovery system in the gas preheater heat exchanger. It has been determined that the maximum energy costs for implementing the method do not exceed 25% of the heat obtained during the process of flue gas heat recovery

Regarding the method of mixing a portion of air heated in an air preheater into the flue gases after the heat recovery unit, it has been established that the costs

of implementing the method under the conditions considered amount to approximately 10% of the recovered heat.

An assessment was carried out of the effectiveness of the method for reducing heat losses from the surface of the flue-gas pipe casing to the environment by means of thermal insulation or the installation of a gas extraction shaft across a wide range of variations in the waste incineration plant's load and the moisture content of the flue gases upstream of the heat recovery system. It has been established that the prevention of condensation formation in the flue-gas stack is only achievable at sub-zero ambient air temperatures for all considered flue gas moisture contents.

The results of a comparative analysis of the investigated methods for preventing condensation formation in terms of the costs of their implementation are presented.

**The fourth chapter** presents the results of studies on thermal and moisture regimes in flue-gas stacks when a set of thermal methods is applied for the anti-corrosion protection of flue gas ducts. The results of an analysis of the effect on the thermal and moisture conditions in flue-gas stacks of the thermal method of reducing heat loss to the environment by insulating the flue-gas stack or installing an insert flue-gas pipe within it are presented. Data are presented on establishing the patterns of change in thermal and moisture characteristics at the mouth of a thermally insulated flue-gas stack when using the air method. The results of studies on determining the efficiency indicators of the air method for flues with an inserted flue-gas pipe to prevent condensate formation within them are considered. The results of the studies indicate that the use of a combination of thermal methods to prevent condensation formation is significantly more effective in terms of heat loss compared to the use of a single thermal method. Fundamental principles regarding the application of thermal methods to prevent condensation formation in the flue-gas stacks of waste incineration plants are formulated.

**Scientific novelty of the results obtained:**

1. For the conditions of operation of a combined flue gas treatment system in municipal solid waste incineration plants, patterns have been identified in the changes to the thermal and moisture properties of the flue gases depending on the plant's load, the temperature and the moisture content of the gases upstream of the heat recovery unit.
2. Across a wide range of load variations in the MSW incineration plant, the effectiveness of thermal and moisture treatment methods for flue gases has been assessed to prevent condensation formation in the flue gas ducts: passing flue gases past the heat recovery unit, preheating flue gases after the heat recovery unit in a heat exchanger (gas preheater), and mixing a portion of air heated in an air preheater with the flue gases cooled in the heat recovery unit.
3. Data has been obtained on the effectiveness of methods to prevent condensation formation in the flues of MSW incineration plants by reducing heat losses from the flue surfaces through thermal insulation of the flue casing or the installation of a gas exhaust shaft within it.
4. A comparative analysis has been carried out of the effectiveness of the thermal methods considered for preventing condensation formation in the flue gas ducts of MSW incineration plants.
5. The selection of a set of thermal methods to prevent condensation formation in the flue-gas stacks of MSW incineration plants has been justified; the application of these methods ensures the absence of condensation formation in all operating modes of the plants.

**Practical significance** of the results obtained. The results of the research are recommended for use in the design of new MSW incineration plants and for improving the thermal efficiency and reliability of plants currently in operation.

The scientific results obtained are also used in educational processes for the training of relevant specialists.

**Keywords:** municipal solid waste, waste incineration plants, waste-to-energy, heat recovery systems, protection of flue gas ducts, thermal methods of

duct protection, air method, method, flue gas heating method, thermal insulation, bypass method, flue gases, flue-gas stacks, thermal-humidity regime, prevention of condensation, swirl burner, coiled heat exchanger, thermohydraulic processes, heat transfer resistance, heat transfer coefficient, boiler plant air heater.

### **List of applicant's publications**

Scientific works in which the main scientific results of the dissertation are published:

1. Shevchuk S., Zhuchenko I. Prevention of condensation in chimneys of waste incineration plants with waste heat recovery systems. *Theory and Building Practice* 2026; Volume 8, Number 1, Pp. 165-172.

<https://doi.org/10.23939/jtbp2026.01.165>

2. N. Fialko, I. Zhuchenko. The heat recovery equipment features of the application in Dusty gas flows. *Energy and Automation*, 2026 1(1), 4-12.

[https://doi.org/10.31548/energiya1\(83\).2026.004](https://doi.org/10.31548/energiya1(83).2026.004)

3. Fialko N., Navrodska R., Zhuchenko I., Shevchuk S., Gnedash G. Problems of gas exhaust ducts operational reliability of municipal solid waste incineration plants and ways to solve them. *Thermophysics and Thermal Power Engineering*, 2025, 47 (1), 7-18. <https://doi.org/10.31472/ttpe.1.2025.1>

4. Fialko N., Navrodska R., Zhuchenko I., Shevchuk S., Gnedash G. Ensuring reliable of chimneys waste incinerators with exhaust heat recovery systems. *Thermophysics and Thermal Power Engineering*, 2025, 47 (3), 62-71.

<https://doi.org/10.31472/ttpe.3.2025.6>

5. Fialko N., Navrodska R., Shevchuk S., Zhuchenko I., Gnedash G. Effectiveness of the bypass method for anticorrosion protection of gas exhaust ducts of a waste incinerator boiler. *International Scientific Journal "Internauka"*, 2025, 2. <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2025-2-10728>

6. Fialko N., Navrodska R., Shevchuk S., Zhuchenko I., Gnedash G. Prevention of condensation in the chimney of a waste incinerator boiler when using heat recovery technologies. *International Scientific Journal "Internauka"*, 2025, 3. <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2025-3-10835>

7. Fialko N., Navrodska R., Shevchuk S., Zhuchenko I., Gnedash G. Providing anti-corrosion protection of the waste incineration boiler chimney by adding heated air. *International Scientific Journal "Internauka"*, 2025, 7. <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2025-7-11175>

Scientific works that certify the approbation of the dissertation results:

1. Fialko N., Navrodska R., Zhuchenko I., Shevchuk S., Gnedash G. Flue gas bypassing as a method of increasing the operational reliability of gas exhaust ducts of municipal solid waste incineration plants. Abstracts, LIV All-Ukrainian Scientific and Technical Conference of the Faculty of Construction, Civil and Environmental Engineering, 2025, p. 373-376.

<https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/view/904/1576/2888-1>

2. Fialko N., Navrodska R., Zhuchenko I., Shevchuk S., Gnedash G. The influence of dustiness of combustion products on the efficiency of heat recovery equipment of waste incineration plants, XXXIV International Online Conference "Problems of Ecology and Operation of Energy Facilities", Collection of Works "Problems of Ecology and Operation of Energy Facilities" (C. 85 - 88). 2025, Kyiv, IVC ALCON NAN.

[http://ittf.kiev.ua/wp-content/uploads/2025/12/sbornik\\_2025\\_vse.pdf](http://ittf.kiev.ua/wp-content/uploads/2025/12/sbornik_2025_vse.pdf).

3. Fialko N. M., Navrodska R. O., Gnedash G. O., Shevchuk S. I., Zhuchenko I. M. The efficiency of use of a gas-heater and thermal insulation for anti-corrosion protection of the exhaust-ducts of waste incinerator boiler. Science in the modern world: innovations and challenges. Proceedings of the 8th International scientific and practical conference. Perfect Publishing. Toronto, Canada. 2025. Pp. 177-182. <https://sci-conf.com.ua/viii-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-science-in-the-modern-world-innovations-and-challenges-17-19-04-2025-toronto-kanada-arhiv/>

4. Fialko N. M., Navrodska R. O., Gnedash G. O., Shevchuk S. I., Zhuchenko I. M. Problems of operation of ecologically efficient gas-fired heating boilers. Scientific achievements of contemporary society. Proceedings of the 9th International scientific and practical conference. Cognum Publishing House.

London, United Kingdom. 2025. Pp. 118-123. <https://sci-conf.com.ua/ix-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-scientific-achievements-of-contemporary-society-4-6-04-2025-london-velikobritaniya-arhiv/>

5. Zhuchenko I. Methods for reducing nitrogen oxide emissions from water heating boilers. Abstracts Innovative technologies in construction. Vinnytsia, Ukraine, 2024. p. 373-376.

<https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/view/869/1514/2811-1>

6. Zhuchenko I. Development of the heat supply system, Abstracts LII Scientific and Technical Conference of the Faculty of Construction, Civil and Environmental Engineering. Vinnytsia, Ukraine, 2023 p. 1722-1724.

<https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/view/788/1373/2632-1>

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	17
ВСТУП .....	19
РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН ПРОБЛЕМИ. МЕТА ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	24
1.1 Аналіз стану використання скидної теплоти в сучасних технологіях термічного знешкодження побутових відходів .....	24
1.2 Проблеми експлуатаційної надійності газовідвідних трактів паливоспоживальних промислових і енергетичних установок України та шляхи їх вирішення.....	30
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1 .....	41
РОЗДІЛ 2. ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ТЕПЛОВИХ МЕТОДІВ ЗАПОБІГАННЯ КОНДЕНСАТОУТВОРЕННЮ В ГАЗОВІДВІДНИХ ТРАКТАХ ДЛЯ ЇХ АНТИКОРОЗІЙНОГО ЗАХИСТУ ПРИ ВИКОРИСТАННІ ТЕПЛОУТИЛІЗАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ СМІТТЕСПАЛЮВАЛЬНИХ УСТАНОВОК.....	42
2.1 Специфіка використовуваної системи теплоутилізації .....	43
2.2 Характеристика застосовуваних методів .....	45
2.3 Вихідні дані та методика розрахункових досліджень.....	48
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2 .....	55
РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ ТЕПЛОВОЛОГІСНОГО РЕЖИМУ В ДИМОВИХ ТРУБАХ ЗА УМОВ ЗАСТОСУВАННЯ ТЕПЛОВИХ МЕТОДІВ ТЕПЛОВОЛОГІСНОЇ ОБРОБКИ ДИМОВИХ ГАЗІВ ПІСЛЯ ТЕПЛОУТИЛІЗАЦІЇ ДЛЯ ЗАПОБІГАННЯ КОНДЕНСАТО-УТВОРЕННЮ В ГАЗОВІДВІДНИХ ТРАКТАХ.....	56
3.1 Тепловологісні показники в димовій трубі сміттєспалювальної установки без застосування системи теплоутилізації димових газів та за її наявності.....	56

3.2 Ефективність застосування теплового методу байпасування димових газів .....	59
3.3 Особливості використання методу підсушування охолоджених газів у газопідігрівачі .....	64
3.4 Закономірності зміни основних тепловологісних характеристик в димовій трубі у разі реалізації повітряного методу .....	68
3.5 Порівняльний аналіз застосовуваних методів .....	72
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3 .....	75
РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВОЛОГІСНИХ РЕЖИМІВ В ДИМОВИХ ТРУБАХ У РАЗІ ЗАСТОСУВАННЯ КОМПЛЕКСУ ТЕПЛОВИХ МЕТОДІВ ДЛЯ АНТИКОРОЗІЙНОГО ЗАХИСТУ ГАЗОВІДВІДНИХ ТРАКТІВ .....	78
4.1 Аналіз впливу на тепловологісний стан в димових трубах теплового методу зменшення втрат теплоти в навколишнє середовище шляхом теплоізоляції димової труби або розміщення в ній вставного газовідвідного ствола .....	78
4.2 Встановлення закономірностей зміни тепловологісних характеристик в гирлі теплоізольованої димової труби при використанні повітряного методу .....	87
4.3 Визначення показників ефективності повітряного методу для труб зі вставним газовідвідним стволом для відвернення в них випадення конденсату .....	92
4.4 Принципові положення щодо застосування теплових методів запобігання конденсатоутворенню в димових трубах сміттєспалювальних установок .....	95
ВИСНОВКИ .....	100
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	102
ДОДАТОК А .....	112

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

### Позначення:

$K_{\text{ох}}$  – коефіцієнт охолодження;

$Q$  – теплопродуктивність, кВт;

$t$  – температура, °С;

$X$  – вологовміст, кг/кг с.г.

### Грецькі символи:

$\alpha$  – коефіцієнт теплообміну (тепловіддачі);

$\gamma$  – відносні витрати теплоти на застосування методу;

$\Delta$  – різниця;

$\delta$  – товщина, м;

$\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності;

$\sigma$  – частка підмішуваного повітря;

$\chi$  – частка байпасування.

### Індекси:

вих – вихід;

вит – витрати;

вх – вхід;

г – гази;

еф – ефективний;

із – ізоляція;

нс – навколишнє середовище;

п – повітря;

пов – внутрішня поверхня;

пш – прошарок;

р – роса;

с.г. – сухі гази;

см – суміш;

с.п. – сухе повітря;

ту – теплоутилізаційне устаткування.

**Скорочення:**

ССУ – сміттєспалювальна установка;

СТУ – система теплоутилізації;

ТВМ – теплоутилізатор водотрубний модульний;

ТПВ – тверді побутові відходи.

## ВСТУП

**Обґрунтування вибору теми дослідження.** Термічне знешкодження (спалювання) твердих побутових відходів (ТПВ) є одним із найбільш ефективним способів зменшення пов'язаних з ними екологічних загроз. Сучасні тенденції щодо використання установок термічного знешкодження ТПВ направлені не лише на ліквідацію сміття, але і, зокрема, на комбіноване вироблення в них теплової і електричної енергії, а також на ощадне використання палива на експлуатацію цих установок.

Один із шляхів ощадного використання палива полягає в рекуперації (утилізації) частини теплоти скидних димових газів в комбінованих системах теплоутилізації з використанням цієї теплоти для нагрівання різних теплоносіїв.

Рекуперація скидної теплоти сміттєспалювальних установок пов'язана з певними труднощами щодо створення та експлуатації теплоутилізаційних систем та їхніх газовідвідних трактів, і особливо димових труб.

Димові труби є невід'ємною частиною і відповідальним елементом практично усіх паливоспоживальних енергетичних установок. Основною функцією цих димарів є забезпечення нормативних умов розсіювання шкідливих викидів, що утворюються при реалізації технологічних процесів вказаних установок. Від експлуатаційної надійності димових труб залежить безперебійна та екологічно безпечна робота промислових і енергетичних об'єктів. Зниження цієї надійності пов'язано з руйнуванням димарів в процесі експлуатації.

Основними причинами такого руйнування є порушення проєктних температурно-вологісних режимів експлуатації димарів. Інтенсивність руйнування залежить від багатьох факторів, зокрема і від хімічної та механічної агресивності газового середовища, що відводиться димовими трубами.

Однією з загроз зниження експлуатаційної надійності димових труб є небезпека від конденсатоутворення в цих каналах за умов глибокого охолодження газових викидів, яке реалізується при застосуванні сучасних теплоутилізаційних технологій з глибоким охолодженням димових газів.

Тому у разі застосування таких технологій в паливоспоживальних енергетичних установках виникає проблема захисту їхніх газовідвідних трактів і особливо димових труб – останнього, найбільш уразливого до руйнування, елемента цих трактів.

Зважаючи на підвищений вологовміст та високу хімічну і механічну агресивність димових газів сміттеспалювальних агрегатів та їх відносно низьку температуру, розроблення заходів щодо антикорозійного захисту газовідвідних трактів цих агрегатів за умов застосування теплоутилізаційних технологій потребує особливої уваги та є вельми актуальним.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана згідно плану НДР Інституту технічної теплофізики НАН України у відділі «Теплофізики енергоефективних теплотехнологій» за науковою тематикою: 1230 «Розроблення технічних засад нової високоефективної технології спалювання штучних палив з твердих побутових відходів та біомаси у когенераційних енергоустановках з використанням водню, кисню, синтетичного та біометану для забезпечення енергетичної безпеки України» (№ ДР 0103U003964) та «Теплофізичні засади підвищення енергоекологічної ефективності в теплоенергетиці і енергомашинобудуванні при використанні традиційних енергоресурсів, відновлюваних газів та твердих побутових відходів» (шифр: 1.7.1.909).

**Мета і завдання дослідження.** Метою роботи є теплофізичне обґрунтування умов застосування теплових методів запобігання конденсатоутворення у газовідвідних каналах сміттеспалювальних установок з системами теплоутилізації димових газів.

Для досягнення вказаної мети вирішенню підлягали такі завдання:

1. Виконати аналіз досвіду та проблем експлуатації газовідвідних трактив установок спалювання ТПВ, і зокрема, їх останнього, найбільш уразливого до руйнування, елемента – димових труб.

2. Дослідити тепловологісні режими та виконати аналіз ефективності систем глибокої теплоутилізації відхідних газів установок спалювання ТПВ, з використанням утилізованої теплоти для нагрівання повітря на горіння та зворотної води теплових мереж.

3. Виконати порівняльний аналіз ефективності використання для антикорозійного захисту димових труб установок спалювання ТПВ різних класів теплових методів запобігання конденсатоутворенню в газовідвідних трактах – методів спрямованих на зменшення теплових втрат з поверхні димових труб та тепловологісної обробки димових газів після теплоутилізації.

4. Дослідити можливості використання комплексу теплових методів для забезпечення відсутності конденсатоутворення в димових трубах при всіх режимах роботи сміттеспалювальної установок.

**Методи дослідження.** Вирішення поставлених завдань здійснювалося з використанням відомих та оригінальних розрахункових методик визначення теплових характеристик систем утилізації теплоти, тепловологісного стану димових газів, методів моделювання, планування експерименту тощо.

**Ступінь обґрунтованості наукових положень та висновків.** Достовірність наукових положень та висновків, представлених у дисертації, базується на використанні сучасних розрахункових методик, адекватності постановок задач, що розглядаються, зіставленні з результатами інших досліджень щодо отриманих результатів тощо.

**Наукова новизна одержаних результатів.** Серед наукових результатів дисертації, одержаних вперше, можна відзначити такі:

1. Для умов застосування комбінованої системи утилізації димових газів установок спалювання ТПВ встановлено закономірності зміни

тепловологісного стану димових газів в залежності від навантаження цих установок, температури та вологовмісту газів перед теплоутилізатором.

2. В широкому діапазоні зміни навантажень установки для спалювання ТПВ виконано оцінку ефективності методів тепловологісної обробки димових газів для відвернення конденсатоутворення у газовідвідних трактах: пропускання димових газів повз теплоутилізатор, підігрівання димових газів після теплоутилізатора у теплообміннику – газопідігрівачі, підмішування до охолоджених в теплоутилізаторі димових газів частини повітря, нагрітого у повітрянагрівачі.

3. Одержано дані щодо ефективності застосування для запобігання конденсатоутворення в димових трубах установок спалювання ТПВ методів зменшення теплових втрат з поверхонь димових труб шляхом теплоізоляції корпусу труби або монтування в неї газовідвідного ствола.

4. Виконано порівняльний аналіз ефективності розглянутих теплових методів відвернення конденсатоутворення в газовідвідних трактах установок для спалювання ТПВ.

5. Обґрунтовано вибір комплексу теплових методів запобігання конденсатоутворення в димових трубах установок для спалювання ТПВ, застосування яких забезпечує відсутність утворення конденсату в усіх режимах роботи установок.

### **Практичне значення отриманих результатів.**

Результати виконаних досліджень рекомендовані до використання при проектуванні нових установок спалювання ТПВ та для підвищення теплової ефективності та надійності установок, що перебувають в експлуатації.

Отримані наукові результати використовуються також в учбових процесах при підготовці відповідних фахівців.

**Особистий внесок здобувача.** Здобувачем самостійно виконано аналіз стану досліджень з наявної проблеми. Автор брав участь у постановці завдань дослідження, виконанні обчислювальних експериментів, обробці та аналізі отриманих результатів.

Автору дисертації належить вибір методів та методик дослідження, створення відповідного програмного забезпечення і виконання необхідного комплексу розрахунків. Автор брав участь у обробленні та аналізі результатів розрахункових досліджень. У співавторстві було також здійснено аналіз ефективності пропонованих заходів та методів щодо захисту газовідвідних трактів.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати роботи обговорювались та отримали схвалення на LII Науково-технічній конференції факультету будівництва, цивільної та екологічної інженерії (м. Вінниця, Україна, червень 2023 р.); Міжнародній науково-технічній конференції «Інноваційні технології в будівництві» (м. Вінниця, Україна, листопад 2024 р.), LIV Всеукраїнській науково-технічній конференції факультету будівництва, цивільної та екологічної інженерії (м. Вінниця, Україна, червень 2025 р.); IX Міжнародній науково-практичній конференції «SCIENTIFIC ACHIEVEMENTS OF CONTEMPORARY SOCIETY» (м. Лондон, Великобританія, квітень 2025 р.); VIII Міжнародній науково-практичній конференції «SCIENCE IN THE MODERN WORLD: INNOVATIONS AND CHALLENGES» (м. Торонто, Канада, квітень 2025 р.); XII міжнародній конференції «Проблеми теплофізики та теплоенергетики» (м. Київ, Україна, листопад 2025 р.); XXXIV Міжнародній конференції «Проблеми екології та експлуатації об'єктів енергетики» (м. Київ, грудень 2025 р.).

**Публікації.** Зміст дисертації викладено у 7 наукових працях. Зокрема, 7 статей, 4 з яких у фахових виданнях, 3 статті у міжнародних періодичних виданнях.

**Структура дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та 1 додатку. Загальний обсяг роботи становить 112 сторінок, у тому числі всього 92 ілюстрації, 6 таблиць, список літератури, що включає 78 найменування. Об'єм основного тексту дисертації – 111 сторінок.

## **РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН ПРОБЛЕМИ. МЕТА ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ**

### **1.1 Аналіз стану використання скидної теплоти в сучасних технологіях термічного знешкодження побутових відходів**

Дослідженням щодо розроблення та використання технологій термічного знешкодження твердих побутових відходів (ТПВ) та штучних палив з них в світовій енергетичній практиці приділяється велика увага. Ці технології є досить різноманітними [1-3] і охоплюють сукупність технологій, які безпосередньо спалюють побутові відходи з відновленням енергії для вироблення електричної і (або) теплової енергії. Установки для спалювання ТПВ, або інакше сміттєспалювальні установки (ССУ), комплектуються із устаткування для спалювання і доспалювання ТПВ, устаткування для перетворення та відновлювання енергії, систем очищення димових газів, допоміжного устаткування тощо. Спалювання ТПВ та штучних палив з ТПВ може здійснюватись за різними технологіями: високотемпературне спалювання, газифікація, піроліз і розкладання в плазмі. Для цього використовуються різні конструкції печей [4, 5]. Вибір технології спалювання відходів є досить складним процесом, оскільки необхідно враховувати багато факторів технічного і вартісного характеру стосовно умов конкретного застосування технології. Одним із завдань під час створення установок термічного знешкодження побутових відходів є забезпечення їхнього ефективного спалювання в заданому обсязі. Теплота, яка виділяється в процесі спалювання, повинна бути корисно використана. Рекуперація цієї теплоти може одночасно вирішити дві проблеми: очищення нерафінованих і нераціональних відходів; і генерування великого обсягу енергії для задоволення потреб споживачів [6-10]. У створених системах рекуперації теплоти технологій знешкодження побутових відходів використовується різноманітне теплоутилізаційне устаткування [11-17]. Одним із різновидів цього устаткування є підігрівачі повітря різного

конструкційного виконання. Це повітропідігрівачі на основі термосифонів [17], поверхневі теплообмінники-рекуператори, які виготовлюються з керамічних або металевих матеріалів в залежності від їхнього застосування [18–22], виті теплообмінники, стаціонарні регенеративні теплообмінники з використанням сучасних акумуляційних матеріалів з високою теплоємністю [23], обертові регенератори, які працюють аналогічно стаціонарним апаратам за умов передавання тепла через пористе теплове колесо між гарячими і холодними тепловими потоками [24], а також інші теплообмінні апарати.

За результатами огляду літературних джерел використання скидної теплоти установок термічної обробки сміття може здійснюватись в котлах, призначених для вироблення теплової енергії у вигляді пари, гарячої води або іншого теплоносія. Котли можна розподілити на такі категорії: водогрійний котел, призначений для нагрівання води або іншого теплоносія; паровий котел для генерування пари низького тиску; паровий котел, що слугує для генерування насиченої або перегрітої пари, а також для підігрівання води [1, 25–29].

Енергія виробленої пари може бути перетворена в електричну енергію за допомогою турбіни або генератора. Після закінчення роботи парогенератора температура відхідних димових газів знижується до 200 – 300 °С. Вироблена пара має тиск від 17 до 30 бар і температуру від 250 до 300 °С.

Виробляючи лише електричну енергію в сміттєспалювальних установках, можна утилізувати до 35 % доступної енергії відходів. Цей варіант може бути привабливим, якщо сміттєспалювальне підприємство розташовується далеко від споживачів. При комбінованому виробництві тепла і електроенергії можна утилізувати до 85 % теплоти спалювання ТПВ.

В результаті виконання аналізу стану досліджень щодо використання скидної теплоти сміттєспалювальних установок можна зробити висновок про актуальність вибору і реалізації технології спалювання ТПВ та палив з них і

застосування ефективних конструкцій теплообмінного устаткування для рекуперації скидної теплоти при спалюванні ТПВ.

Аналіз досліджень стосовно застосування вказаних технологій показав також, що важливим фактором у розробці цих технологій та відповідного устаткування має морфологічний та гранулометричний склад сміття, а також його теплотехнічні характеристики, зокрема теплота згоряння, вологість тощо. Ці характеристики і особливості спалювання сміття впливають на склад димових газів, які містять шкідливі та хімічно агресивні сполуки у газовій фазі та твердий технологічний виніс у вигляді пилу різного фракційного спектру.

Окрім негативного впливу на довкілля, хімічна агресивність та запиленість димових газів ускладнює експлуатацію теплообмінного устаткування та газовідвідних каналів і може призвести до їх недієздатності.

Значний обсяг досліджень щодо розглянутої тематики присвячений процесам спалювання відходів. Основним паливом в сміттєспалювальних установках є переважно ці відходи або штучне паливо з них (хоча викопне паливо може використовуватись разом з ними), а джерелом кисню є повітря. При цьому утворюється багато однакових стабільних кінцевих продуктів, незалежно від того, що спалюється – природний газ, вугілля, деревина, бензин, тверді побутові відходи, небезпечні відходи або медичні відходи. Зона полум'я в добре спроектованому сміттєспалювальному заводі достатньо гаряча, щоб розщепити всі органічні і багато неорганічних молекул, уможливлючи реакції між найбільш летючими компонентами відходів і киснем та азотом ( $N_2$ ) у повітрі. Переважають реакції між вуглецем (C) і киснем, утворюючи вуглекислий газ ( $CO_2$ ), а також між воднем (H) і киснем, утворюючи водяну пару ( $H_2O$ ). Неповне згоряння органічних сполук у потоці відходів призводить до утворення оксиду вуглецю (CO) та вуглецевмісних частинок. Водень також реагує з органічно зв'язаним хлором, утворюючи хлористий водень (HCl). Крім того, відбувається багато інших реакцій, в результаті яких утворюються оксиди сірки ( $SO_x$ ) зі сполук сірки, оксиди

азоту ( $\text{NO}_x$ ) зі сполук азоту (і, трохи, з азоту в повітрі), оксиди металів тощо [30].

Основними продуктами згоряння палив з ТПВ є  $\text{CO}_2$ , водяна пара та зола, які є відповідно продуктами реакції окислення вуглецю, водню та негорючих матеріалів, що містяться в паливі. Однак, коли реакції згоряння протікають не в повному обсязі, можуть утворюватися інші речовини, деякі з яких є потенційно шкідливими. Типи і концентрації забруднюючих речовин у потоці відходів (димових газах), що утворюються в результаті будь-якого процесу спалювання, залежать від типу процесу, відходів, що спалюються, і умов горіння. Такі забруднювачі походять з трьох джерел: вони або їхні попередники присутні у відходах, вони утворюються в процесі спалювання через неповне окислення, або вони утворюються в результаті реакцій перетворення в системі охолодження газу або в пристрої контролю забруднення повітря (ПКЗП).

Отже, спалювання побутових відходів призводить до утворення викидів, що впливають на клімат [31]. В основному це викиди  $\text{CO}_2$  (вуглекислого газу), а також  $\text{N}_2\text{O}$  (закису азоту),  $\text{NO}_x$  (оксидів азоту),  $\text{NH}_3$  (аміаку) та органічного вуглецю, що вимірюється як загальний вуглець.  $\text{CH}_4$  (метан) не утворюється при спалюванні відходів за нормальної роботи. Він утворюється лише у виняткових випадках і в невеликому обсязі (з відходів, що залишаються в бункері для відходів), так що у кількісному вираженні  $\text{CH}_4$  не слід вважати важливим для клімату.  $\text{CO}_2$  є основним викидом, що впливає на клімат при спалюванні відходів, і він значно перевищує інші викиди, щонайменше в 100 разів, у порівнянні з іншими викидами.

За результатами аналізу виконаних досліджень спалювання 1 мг побутових відходів у сміттєспалювальних заводах пов'язане з виробництвом/вивільненням від 0,7 до 1,2 мг вуглекислого газу  $\text{CO}_2$ . Хоча цей вуглекислий газ безпосередньо викидається в атмосферу і, в такий спосіб, здійснює реальний внесок у парниковий ефект, лише кліматично релевантні викиди  $\text{CO}_2$  з викопних джерел розглядаються в межах

глобального аналізу. У літературі вважається [31], що частка  $\text{CO}_2$ , яка має викопне походження (наприклад, пластмаси) і, відповідно, є шкідливою для клімату і, відповідно, вважається такою, що впливає на клімат, становить від 33 до 50 %.

Дослідження щодо спалювання побутових відходів засвідчили, що при згорянні ТПВ утворюється і оксид вуглецю  $\text{CO}$ , який є продуктом неповного згоряння.  $\text{CO}$  є індикаторною речовиною для процесу спалювання і важливим критерієм якості рівня згоряння. Середні викиди  $\text{CO}$  в середньому за добу становлять менше  $50 \text{ мг/м}^3$  [31]. Заводи з найкращими доступними технологіями (НДТ), мають середньодобові значення в діапазоні  $<10 \text{ мг/м}^3$ .

Що стосується утворення оксидів азоту  $\text{NO}_x$  ( $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ ) у разі спалювання побутових відходів у ССУ, то вони походять в основному з азоту, що міститься у відходах, з самого процесу спалювання та із спонтанної реакції (так звані швидкі  $\text{NO}_x$ ). Як правило, концентрація  $\text{NO}_x$  у відхідних газах вимірюється на цих заводах постійно. Якби на сміттєспалювальних заводах не проводилося жодних заходів для видалення азоту, то викиди оксидів азоту становили б від 350 до 400  $\text{мг/м}^3$ . Рівень викидів у 200  $\text{мг/м}^3$  може бути безпечно досягнутий, якщо здійснюються заходи з селективного очищення відхідних газів (селективне некаталітичне відновлення СНКВ, селективне каталітичне відновлення СКВ). Заводи, що застосовують НДТ, досягають рівня викидів в діапазоні від 100 до 150  $\text{мг NO}_x/\text{м}^3$  у разі використання технології СНКВ і  $<70 \text{ мг NO}_x/\text{м}^3$  у разі технології СКВ. Заводи зі спалювання небезпечних відходів, що використовують НДТ, досягають рівнів викидів в діапазоні від 40 до 50  $\text{мг NO}_x/\text{м}^3$  у разі використання технології СКВ.

В сміттєспалювальних установках за свідченнями багатьох дослідників утворюються і сполуки аміаку  $\text{NH}_3$ , зокрема, внаслідок використання власне аміаку (а також аміачної води) як добавки в процесах очищення відхідних газів для видалення азоту. Як правило, концентрації викидів вказаних сполук (визначених в результаті індивідуальних вимірювань) змінюються в діапазоні

1 – 10 мг/м<sup>3</sup>, при цьому середнє значення зазвичай приймається рівним 4 мг NH<sub>3</sub>/м<sup>3</sup>.

Характерним індикатором рівня спалювання, досягнутого в процесі термічної обробки ТПВ, є неметанові леткі органічні сполуки. Ці сполуки (органічний вуглець) у скидних газах сміттєспалювальних заводів постійно вимірюються як сумарний показник загального вуглецю. Викиди підлягають обмеженню на рівні 10 мг/м<sup>3</sup>, але заводи, що застосовують НДТ, як правило, досягають рівня викидів 1 мг/м<sup>3</sup>.

За результатами аналізу стану досліджуваної проблеми у складі технологічного виносу сміттєспалювальних установок, як вже зазначалося, є також тверді частинки, які утворюються переважно з негорючих речовин, що містяться у скидних димових газах, та продуктів неповного згоряння, які містяться у твердій або аерозольній фазах. Концентрація твердих частинок у димових газах змінюється переважно від 180 до понад 46 000 мг на сухий стандартний кубічний метр (від 0,08 до понад 20 зерен на сухий стандартний кубічний фут) [30].

В димових газах вказаних установок можуть міститись кислотні гази [30]. Кислі гази – це компоненти димових газів, які утворюють кислоти, коли вони з'єднуються з водяною парою, конденсуються або розчиняються у воді. Кислі гази включають NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, HCl, бромоводень, фтористий водень та йодистий водень. В продуктах згоряння побутового сміття наявні також такі сполуки, HCl і SO<sub>2</sub>, які часто не контролюються в потоках димових газів. Їхня концентрація становить від декількох сотень до декількох тисяч частинок на мільйон за об'ємом. Концентрації NO<sub>x</sub>, фтористого водню та триоксиду сірки, як правило, нижче декількох сотень частинок на мільйон об'єму. Вільні галогени, такі як хлор, бром і йод, також можуть утворюватися в низьких концентраціях під час спалювання відходів, що містять сполуки цих елементів.

## **1.2 Проблеми експлуатаційної надійності газовідвідних трактів паливоспоживальних промислових і енергетичних установок України та шляхи їх вирішення**

Проблеми експлуатаційної надійності паливоспоживальних установок, є надзвичайно актуальними для промислових та енергетичних підприємств. Аналізу цих проблем, а особливо надійності і довговічності димових труб приділена значна увага дослідників. Димові труби слугують для створення природної тяги та транспортування вихідних димових газів паливоспоживальних установок у верхні шари атмосфери задля їх розподілу в атмосфері згідно з допустимими концентраціями шкідливих викидів, які містять димові гази і які регламентуються чинними санітарними нормами. Відповідно до призначення труби вони поділяються на два типи: тягові і відвідні (розсіювальні). Перші призначені для надходження повітря в робочий простір топки. Другі – для евакуації димових газів у верхні шари атмосфери. Багато труб виконують ці функції одночасно.

На промислових та енергетичних об'єктах України, що експлуатують паливоспоживальні установки різного типу, в залежності від основного конструкційного матеріалу експлуатуються цегляні, залізобетонні, металеві та комбіновані димові труби [32, 33].

На сьогодні в найбільш раціональному висотному діапазоні (більше 90 м), який зазвичай забезпечує вимоги всіх екологічних стандартів, експлуатується переважний обсяг димових труб [33, 34]. Ці труби виготовлено з футерованого та певним способом захищеного залізобетону. За даними дослідників більшість таких труб, що знаходяться в державній та приватній власності, не придатні до умов нормативної експлуатації через дефекти у несучих конструкціях, які виникли здебільшого через недотримання регламентів їхнього функціонування, зазвичай відсутністю технічного нагляду з виконанням певних технічних діагностичних заходів [35] тощо. Наслідком цього є необхідність здійснення заходів щодо

реконструкції і оптимізації димових труб, зокрема у разі необхідності виконання невідкладних протиаварійних заходів щодо відновлення щільності несучого ствола цих димарів.

Цегляні труби, з яких почалася історія виготовлення промислових димових труб, мають висоту не вище 90 м. Завдяки використанню різних конструктивних рішень газоходів і застосуванню різноманітних футеровок ці труби використовуються для відводу димових газів з широким діапазоном температур, найчастіше досить високих.

Залізобетонні димові труби зазвичай бувають заввишки більше 90 м і, в основному, застосовуються на об'єктах енергетики і промислових підприємств (рис.1.1).

Димові труби зі збірного бетону призначені для відводу димових газів з невеликих котелень. Цей вид димових труб споруджують за типовими проектами висотою 30 і 45 м. В окремих ситуаціях допускається будівництво труб висотою 75 м. Їх, як правило, використовують без футерування.

У разі експлуатації труб у високих температурних режимах і високій агресивності димових газів (зазвичай запічних) як у збірних, так і у монолітних димових трубах існує можливість монтування часткової чи повної футеровки ствола.

За результатами досліджень стану експлуатації димових труб можна вказати на такі переваги залізобетонних труб над цегляними:

- тонші стінки ствола труби, що, в свою чергу, зрештою забезпечує значне зменшення ваги споруди;
- можливість виконання більш економічного фундаменту;
- істотно спрощений монтаж труб та зменшена тривалість робіт із зведення споруди.

Економічна вигода у встановленні залізобетонної труби, у порівнянні з цегляною трубою, виникає за умови її висоти вище 60 м [33].



Рисунок 1.1 Конструкції сучасних димових труб: а – цегляні; б, в – зі збірним чи монолітним залізобетонним стволом; г – металеві; д – з полімерних матеріалів; е – комбіновані.

Металеві димові труби забезпечують повну газо- і вологонепроникність, а також герметичність газовідвідного тракту. Крізь щільний матеріал стінок не проходить конденсат і агресивні компоненти димових газів. Це забезпечує безвідмовну роботу вказаних споруд навіть за умови надлишкового тиску, що, в свою чергу, збільшує швидкість руху газів і, відповідно, висоту розсіювання викидів. Окрім того, на внутрішній та

зовнішній поверхнях металевої труби можна зробити футерування практично будь-якої складності із застосуванням інертних епоксидних покриттів та естетичних лакофарбових матеріалів.

Відносно нещодавно з'явилися димові труби з полімерних композиційних матеріалів (пластикові труби), які, як і металеві, забезпечують герметичність газовідвідних трактів, не адсорбують конденсат і шкідливі компоненти димових газів, мають високу корозійну стійкість. Полімерні димові труби не потребують футерування. Однак є і суттєвий недолік – композитні стволи таких споруд, на жаль, не можуть ефективно працювати в умовах температур газів понад 180...200 °С.

Останнім часом все ширшого застосування набувають димові труби зі вставними газовідвідними стволами. Основною особливістю цих труб є розміщення в одній залізобетонній або металевій оболонці металевих газовідвідних стволів (МГС) [36]. Такі труби можна розділити на дві групи: а) одноствольні – без окремих газовідвідних стволів, у яких форма ствола визначається формою оболонки (зазвичай конічної); б) багатоствольні – з окремими від оболонки одним або декількома стволами із зазором між ними.

До прикладу на рис. 1.2 показано триствольну димову трубу із залізобетонною оболонкою, яка використовується для евакуації відхідних димових газів [37].

При використанні багатоствольних димових труб в комунальних котельнях береться до уваги, що за умовами надійності водогрійні котли, що працюють у звичайному режимі, і пікові котли доцільно, головним чином, підключати на один газовідвідний ствол, тобто не виділяти окремого ствола для пікових котлів.

Застосування вставних газовідвідних стволів, окрім забезпечення ефективної експлуатації установок, може сприяти антикорозійному захисту димових труб шляхом запобігання в них конденсатоутворенню за умов застосування теплоутилізаційних технологій.

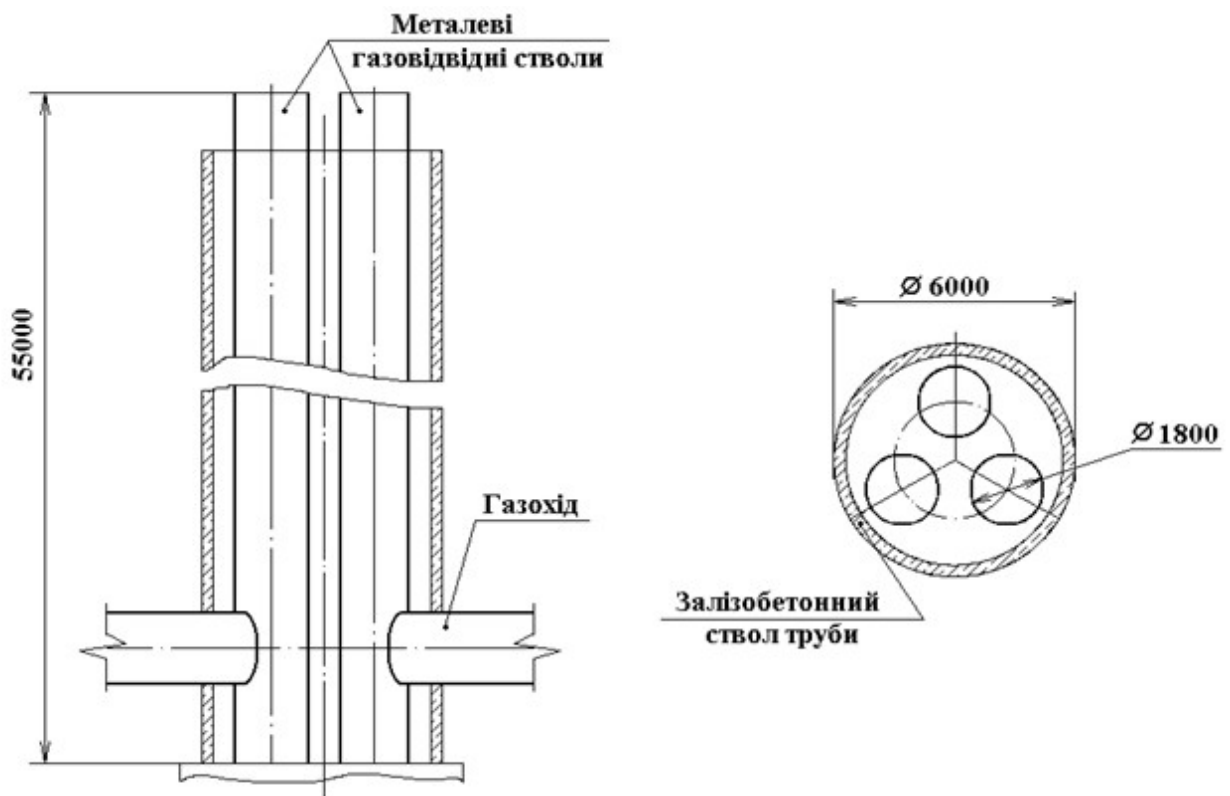


Рис. 1.2. Залізобетонна димова труба з трьома металевими газовідвідними стволами.

Результати аналізу літературних джерел щодо конструкційних особливостей застосовуваних димарів для промислових та енергетичний об'єктів та їхні інноваційні рішення будуть використані при розробленні та обґрунтуванні технології антикорозійного захисту установок спалювання твердих побутових відходів та палив з них.

### **Технічний стан експлуатації застосовуваних димових труб**

Дослідженню технічного стану експлуатації димових труб призв'язана значна кількість наукових праць. Під час експлуатації в конструкціях цих споруд накопичуються дефекти і руйнування, які зрештою можуть призвести до їхнього остаточного руйнування і необхідності заміни.

Експлуатаційне фізичне зношування і відсутність своєчасних відновлювальних робіт [38, 39] є основними причинами руйнування димових труб, що мають високі ризики їхнього обвалення. Головними причинами виникнення дефектів, і як результат, руйнування конструкцій димових труб, є такі причини:

- відхилення від проектного режиму експлуатації;
- відсутність належного і своєчасного контролю стану конструкцій труб;
- несвоєчасне усунення виявлених дефектів;
- експлуатація в аварійному стані.

Технічний стан переважної більшості труб на деяких підприємствах України на сьогодні не є задовільним і без застосування заходів щодо їх ремонтування для відновлення вони є приречені на подальше руйнування та повний вихід із ладу.

Найбільш вірогідними для руйнування елементами димових труб є: несуча оболонка (ствол) у верхній третині висоти [40], верхній і нижній яруси футерування, підземні конструкції стволів і газоходів за умови високого рівня ґрунтових вод, металоконструкції гарнітури тощо.

Основний механізм руйнування конструкції у разі експлуатації цегляних і залізобетонних димових труб пов'язаний з руйнуванням захисного футерування, зокрема його розшарування та відхилення. Після таких руйнувань створюються непроекtnі режими експлуатації внутрішньої оболонки несучого бетону ствола димової труби, яка не придатна до контакту з евакуйовуваними димовими газами. Результат впливу цих газів на несучий ствол димової труби призводить до утворення: критичних температурних полів, які викликають напругу стиску і розтягування, що призводять до утворення і розширення тріщин; корозії арматури, через яку відбувається збільшення об'єму бетону і його руйнування; процесів карбонізації і сульфатації кальцію у бетонній оболонці, які порушують його структуру і змінюють густину, що в свою чергу призводить до асиметрії маси димової труби відносно її висоти. Як наслідок, вказані руйнування цегляних і залізобетонних димових труб призводять до значного зниження терміну їхньої експлуатації і необхідності заміни цих труб (рис. 1. 3).



Рис. 1.3. Характерні дефекти димових труб.

Що стосується проблем експлуатації металевих димових труб, то вони також перебувають під дією специфічних силових, динамічних, температурних і корозійних впливів [41-44]. Усі ці чинники призводять до суттєвого руйнування вказаних труб. Під час експлуатації ці споруди зазвичай піддаються спільній дії високих температур і корозійного зношування (рис. 1.4), що суттєво знижує довговічність і залишковий ресурс димової труби.

Основними механізмами пошкоджень і руйнування конструкцій димових труб є: механічні, хімічні та комбіновані впливи.

До **механічних** впливів належать силові і температурно-вологісні впливи, зумовлені зміною проектного режиму експлуатації труби в

залежності від погодних факторів та технологічного режиму експлуатації основного устаткування. До механічних факторів належить також абразивне зношування внутрішньої поверхні димової труби.



Рис. 1. 4. Корозійні пошкодження димової труби:

а) – корозійне зношування ствола до 20 % перетину; б) наскрізна корозія дна труби.

**Силові** впливи викликають здебільшого деформаційні дефекти металоконструкцій. **Тепло-вологісні** дії спричиняють руйнування, які виявляються у встановленні закономірної послідовності горизонтальних і вертикальних тріщин, відшаруванням футерування, появою конденсату, зокрема і на зовнішній поверхні труби і його обмерзанням в зимовий період.

**Хімічні** впливи виявляються у протіканні хімічних реакцій під дією складових евакуйованих газів на поверхні та у товщині корпусу труб.

Виконаний аналіз стану експлуатації сучасних димових труб паливоспоживальних промислових та теплоенергетичних об'єктів і наявність суттєвих пошкоджень вказує на необхідність розроблення та впровадження ефективних заходів щодо зменшення експлуатаційного руйнування труб та подовження їхнього ресурсу.

#### **Методи захисту димових труб від руйнування**

Виконаний у межах роботи огляд і аналіз проблеми захисту газовідвідних трактів котелень від корозійного та ерозійного руйнування показав, що серед факторів, які посилюють руйнування димових труб шляхом недотримання проектних умов їхньої експлуатації є використання

теплоутилізаційних технологій, що призводять до зниження температур димових газів і зменшення їх обсягів у трубах. Суттєве зниження температури зумовлює конденсатоутворення у газовідвідних трактах. Тому однією з нагальних проблем при підвищенні енергоефективності паливоспоживальних промислових та енергетичних об'єктів є низький термін служби димових труб через конденсатоутворення на їхній внутрішній поверхні. В результаті конденсатоутворення конструкції відвідних газоходів зазнають корозійного руйнування через дію конденсату, що має кислу реакцію, спричинену розчиненими окисами вуглецю та азоту (для газоподібного палива). Показник водню рН такого конденсату зазвичай становить 4...6, а в разі використання рідкого палива в конденсаті розчиняються ще і окиси сірки, тоді  $\text{pH} < 4$ .

Для антикорозійного захисту газовідвідних трактів та, зокрема, димових труб застосовують різноманітні заходи [45, 46]. До них належать заходи, спрямовані на підвищення антикорозійних властивостей корпусів газоходів та димових труб, а також заходи, пов'язані зі створенням тепловологісної обстановки на внутрішній поверхні газовідвідних трактів, що сприяє запобіганню конденсатоутворенню на цих поверхнях. До ефективних заходів щодо антикорозійного захисту димових труб є застосування способів відвернення конденсатоутворення шляхом:

- підігрівання стінок димових труб;
- облаштування вентилярованих каналів;
- підвищення теплоізоляційних властивостей корпусів димових труб під час здійснення їх внутрішньої або зовнішньої теплоізоляції тощо.

До ефективних способів захисту газовідвідних трактів, зокрема, котельних установок за умови глибокої теплоутилізації димових газів, як відомо, належать теплові методи запобігання конденсатоутворенню у відвідних димових каналах. Серед них особливо виділяються методи, пов'язані зі зміною тепловологісних характеристик димових газів після теплоутилізації (часткове байпасування відхідних газів котла повз

теплоутилізаційне устаткування, підмішування до димових газів після вказаного устаткування повітря, нагрітого в повітропідігрівачі котла або іншим шляхом, або підсушування охолоджених газів завдяки їх нагріванню в спеціальних теплообмінниках-газопідігрівачах, встановлених перед димовою трубою. Ці методи, як очевидно, можуть бути реалізовані лише за наявності теплоутилізаційних систем із глибоким охолодженням відхідних димових газів котельних установок.

Дослідженню ефективності застосування зазначених методів для традиційних теплогенерувальних установок з різними типами димових труб та системами теплоутилізації присвячено багато робіт [38, 47-57]. В цих роботах досліджувалися тепловологісні показники (точка роси  $t_p$  та температура внутрішньої  $t_{\text{пов}}$  поверхні) в гирлі димових труб. Разом з тим для кожного з методів визначався коефіцієнт витрат теплоти на реалізацію методів, який розраховувався за відношенням теплової потужності, необхідної для реалізації методу, до теплопродуктивності теплоутилізаційного устаткування. При цьому бралось до уваги, що відвернення конденсатоутворення у газовідвідному тракті передбачає виконання вимоги, згідно з якою температура  $t_{\text{пов}}$  внутрішньої поверхні газовідвідного каналу аж до гирла димової труби має перевищувати точку роси  $t_p$  водяної пари, яка міститься у димових газах,  $t_{\text{пов}} > t_p$ .

До теплових методів запобігання конденсатоутворенню належать і методи зменшення теплових втрат з поверхні димових труб (зокрема шляхом їхньої теплоізоляції або розміщення вставних газовідвідних стволів).

Застосування описаних теплових методів сприяє не лише зменшенню корозійного руйнування димових труб, а і покращенню умов довкілля. Встановлено [58-62], що ці методи у разі використання теплоутилізаційних технологій з глибоким охолодженням димових газів, окрім підвищення надійності димових труб, сприяють екологічному покращенню довкілля. Вказані методи забезпечують ріст швидкості і особливо температури димових газів на виході із гирла труб у порівнянні з ситуацією без

використання методів. За результатами досліджень показано, що пропоновані методи дозволяють за умов використання сучасних теплоутилізаційних технологій, що забезпечують скорочення на 5 – 8 % обсягів використання палива в котлах, покращити до 32 % показники екологічної ефективності димових труб.

## ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1

1. Виконано огляд сучасного стану застосування технологій термічного знешкодження твердих побутових відходів (ТПВ) та палив з них, який засвідчив актуальність використання цих технологій. За результатами огляду виявлено:

- проблеми та особливості використання теплоутилізаційних технологій;
- основні властивості та параметри складу скидних димових газів;
- режимні характеристики застосовуваних теплоутилізаційних установок, зокрема і в умовах глибокої рекуперації теплоти димових газів.

2. Проаналізовано досвід експлуатації газовідвідних трактів паливоспоживальних установок промислових та енергетичних об'єктів і зокрема їх останнього, найбільш уразливого до руйнування елемента – димових труб. Встановлено:

- конструкційні особливості застосовуваних димових труб різного типу та шляхи їх удосконалення;
- причини та механізми руйнування оболонки труб;
- наявні методи захисту димових труб від руйнування.

3. На основі огляду літературних джерел визначено напрям створення енергоефективної теплоутилізаційної системи для сміттєспалювальної установки та встановлено важливість подальших досліджень стосовно захисту її газовідвідних каналів за умов застосування цієї системи. За результатами аналізу стану проблеми сформульовано основні завдання дослідження.

## **РОЗДІЛ 2. ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ТЕПЛОВИХ МЕТОДІВ ЗАПОБІГАННЯ КОНДЕНСАТОУТВОРЕННЮ В ГАЗОВІДВІДНИХ ТРАКТАХ ДЛЯ ЇХ АНТИКОРОЗІЙНОГО ЗАХИСТУ ПРИ ВИКОРИСТАННІ ТЕПЛОУТИЛІЗАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ СМІТТЕСПАЛЮВАЛЬНИХ УСТАНОВОК**

За умов реалізації технологій спалювання твердих побутових відходів (ТПВ) та штучних палив з них газовідвідним каналам притаманні ті ж проблеми, що і для інших паливоспоживальних об'єктів промислового та енергетичного призначення. Однією з цих проблем, як вже зазначалось, є конденсатоутворення у вказаних каналах, що призводить до їх корозійного руйнування і зниження експлуатаційної надійності установок спалювання ТПВ. Дана проблема посилюється у разі застосування теплоутилізаційних технологій з поглибленим охолодженням димових газів [32, 46]. Для сміттєспалювальних установок посилення проблеми пов'язано також із вмістом в продуктах згоряння хімічно агресивних речовин. Особливої небезпеки корозійного руйнування, як завжди, зазнає внутрішня поверхня гирла димової труби, останньої за ходом димових газів ділянки газовідвідного тракту.

Дослідження щодо визначення та аналізу показників тепловологісного стану в гирлі димової труби сміттєспалювальної установки в різних режимах її експлуатації за умов застосування технології глибокого охолодження димових газів є основою для розроблення систем захисту газовідвідних каналів від корозійного зношування, викликаного конденсатоутворенням у цих каналах.

Згідно з завданнями цієї дисертації системи захисту базуються на використанні теплових методів запобігання конденсатоутворенню в газовідвідних трактах. Дослідженню підлягала ефективність застосування таких методів: методу зменшення теплових втрат з поверхні оболонки труби в навколишнє середовище шляхом її теплоізоляції або розміщення вставного

газовідвідного ствола, а також методів тепловологісної обробки димових газів після теплоутилізації (байпасування, підсушування у газопідігрівачі та підмішування нагрітого повітря).

Розглядалася сміттєспалювальна установка, що використовується для потреб опалювання. Основним елементом цієї установки є сміттєспалювальний агрегат (котел), що працює на твердих побутових відходах, або паливах на їхній основі.

Оскільки найбільш уразливою ділянкою газовідвідного тракту є гирло димової труби, під час виконання розрахункових досліджень визначались тепловологісні показники (температура внутрішньої поверхні  $t_{\text{пов}}$  та точка роси вихідних газів  $t_p$ ) саме в гирлі цієї труби.

## **2.1 Специфіка використовуваної системи теплоутилізації**

В роботі для корисного використання теплоти відхідних димових газів розглянутої сміттєспалювальної установки запропоновано (рис. 2.1) схему сучасної комбінованої системи теплоутилізації.

У запропонованій системі утилізована теплота використовується для попереднього підігрівання дуттьового повітря та зворотної води теплової мережі перед надходженням цих теплоносіїв до сміттєспалювального агрегату. Під час розроблення відповідного теплоутилізаційного устаткування розглядалися результати досліджень щодо створення теплоутилізаційних технологій для сміттєспалювальних установок та сучасних теплообмінних апаратів [63-65].

В наведеній схемі димові гази після сміттєспалювального агрегату спершу надходять у повітрогрійний теплоутилізатор, в якому підігрівається повітря на горіння, а далі спрямовуються у водогрійний теплоутилізатор, що слугує для підігрівання зворотної тепломережної води. Обидва застосовувані теплоутилізатори є панельного типу, призначені для використання на запиленних газових потоках. Теплообмінні панелі утворені із труб з мембранами. Конфігурація поверхні теплообміну теплоутилізаторів

відповідає з газового боку конфігурації теплоутилізаторів ТВМ розробки Інституту технічної теплофізики [66]. Ця конфігурація обумовлюється певними розмірами труб і мембран, що сприяє в певних режимах експлуатації частковому самоочищенню панелей від відкладень пилу. У разі необхідності конструкційне виконання теплоутилізаторів дозволяє виконувати примусове очищення робочих поверхонь від відкладень технологічного виносу основного технологічного агрегату, зокрема і сміттєспалювальної установки.

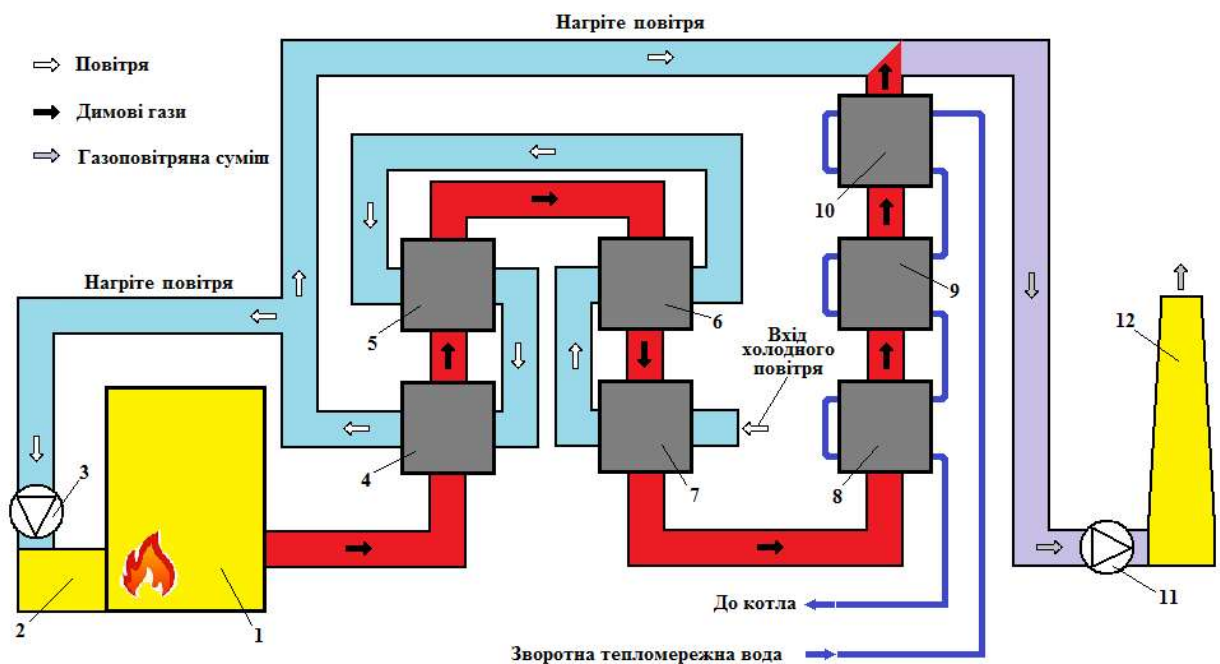


Рис. 2.1. Принципова схема комбінованої теплоутилізаційної системи:

1 – водогрійний сміттєспалювальний агрегат; 2 – газопальниковий пристрій; 3 – вентилятор; 4, 5, 6, 7 – перший, другий, третій і четвертий модулі повітрогрійного теплоутилізатора; 8, 9, 10 – перший, другий і третій модулі водогрійного теплоутилізатора; 11 – димосос; 12 – димова труба.

У водонагрівачі застосовуються гладкі труби без інтенсификаторів теплообміну. Рух теплоносіїв практично протитічний з проходженням води в трубах, а димових газів в міжпанельному просторі.

Для інтенсифікації теплообміну з боку нагріваного повітря, яке проходить всередині труб панелей, ці труби мають кільцеві турбулізатори

потоків, які забезпечують збільшення коефіцієнта тепловіддачі всередині труб в 1,4 – 1,8 разів при відносно невеликому збільшенні аеродинамічного опору з боку повітря. В повітронагрівачі організовано перехреснотоківий рух теплоносіїв з проходженням повітря в трубах, а газів у міжпанельній його частині.

Результати теплового розрахунку запропонованої теплоутилізаційної системи слугують вихідними даними для виконання досліджень щодо аналізу показників тепловологісного стану вихідних димових газів в гирлі димових труб сміттєспалювальної установки та визначенні умов відвернення конденсатоутворення в цих каналах.

## **2.2 Характеристика застосовуваних методів**

Для запобігання конденсатоутворенню в газовідвідному тракті сміттєспалювальної установки з системою глибокої теплоутилізації скидної теплоти розглядається застосування теплових методів. При цьому мається на увазі, що для цього запобігання необхідним є виконання вимоги, згідно з якою температура  $t_{\text{пов}}$  внутрішньої поверхні газовідвідного каналу аж до гирла димової труби має перевищувати точку роси  $t_p$  водяної пари, яка міститься у димових газах,  $t_{\text{пов}} > t_p$ .

Для цієї мети зазвичай застосовуються методи тепловологісної обробки димових газів після теплоутилізації, а саме:

- метод байпасування газів, який полягає в пропусканні частини  $\chi$  гарячих газів від сміттєспалювального агрегату повз теплоутилізаційне устаткування з наступним їх змішуванням з газами, що охололи у цьому устаткуванні. За цих умов підвищується температура суміші газів  $t_{\text{см}}$  на вході у газовідвідний тракт до значення, яке повинно забезпечувати перевищення температури поверхні  $t_{\text{пов}}$  над температурою  $t_p$  точки роси в гирлі димової труби;

- метод підігрівання охолоджених в теплоутилізаційній системі димових газів у поверхневому теплообміннику, встановленому на виході з

системи. Використання цієї поверхні нагрівання (газопідігрівача) слугує для збільшення температури газів на вході в газовідвідний тракт  $t_{\text{ту}}$  до рівня, що забезпечує таке зростання  $t_{\text{пов}}$  в гирлі димової труби, яке відповідає перевищенню температури точки роси  $t_{\text{р}}$  при сталому значенні абсолютної вологості димових газів. Підвищення  $t_{\text{ту}}$  може здійснюватись за рахунок теплоти прямої води сміттєспалювального агрегату, що працює для потреб опалення, або димовими газами перед їх надходженням у теплоутилізаційну систему.

- повітряний метод, за умов застосування якого відбувається зниження абсолютного вологовмісту суміші газів і повітря та підвищення її температури шляхом підмішування в газу після теплоутилізаційної системи частини  $\sigma$  повітря, нагрітого цій системі (за наявності повітрянагрівача), або підведеного зовні.

Для поліпшення тепловологісних умов експлуатації димових труб в дисертаційній роботі розглядається також тепловий метод зменшення втрат теплоти в навколишнє середовище з поверхні оболонки цих труб. Використання вказаного методу реалізується шляхом застосування двох заходів: теплоізолювання корпусу труби, або розміщення в ній газовідвідного ствола.

Рис. 2.2 ілюструє особливості застосовуваних методів, що сприяють покращенню тепловологісного режиму в газовідвідних трактах сміттєспалювальних установок, зокрема механізми впливу на основні показники  $t_{\text{пов}}$  та  $t_{\text{рв}}$  тепловологісного режиму в димовій трубі та дотримання умови  $t_{\text{пов}} > t_{\text{р}}$ .

Оцінка ефективності застосування методів відвернення конденсатоутворення у газовідвідному тракті здійснюється за коефіцієнтом  $\gamma$ , який є відношенням витрат теплової потужності на реалізацію методів до теплової потужності теплоутилізаційної системи без використання методів:

$$\gamma = \frac{Q_{\text{ВИТ}}}{Q_{\text{ТУ}}} \cdot 100, \quad (2.1)$$

де  $Q_{\text{ТУ}}$  – загальна потужність теплоутилізаційного устаткування системи теплоутилізації;  $Q_{\text{ВИТ}}$  – теплова потужність, необхідна для реалізації методу.



Рис. 2.2 Досліджувані теплові методи

Порівняльний аналіз зазначених теплових методів щодо їхньої ефективності стосовно запобігання конденсації в газоспоживальних опалювальних котельнях показав [52], що за умов використання традиційної системи рекуперації з водогрійним теплоутилізатором у разі цегляної димової труби найменшими і близькими за значеннями відносними витратами  $\gamma$  характеризуються методи підсушування димових газів у теплообміннику та часткового байпасування ( $\gamma < 6,4 \%$ ). Для металевої димової труби за величиною  $\gamma$  найбільш ефективним є метод підсушування ( $\gamma < 31,1 \%$ ), дещо меншій ефективності відповідає повітряний метод ( $\gamma < 36,1 \%$ ), а реалізація методу часткового байпасування потребує надто великих витрат теплоти, які перевищують 50 % від теплової потужності утилізатора. Щодо промислових котелень, то для цегляної димової труби відносні витрати теплоти  $\gamma$  при застосуванні розглянутих

методів запобігання конденсатоутворенню є порівняно незначними при низькій температурі нагріваної в теплоутилізаторі води. Так, для методу підсушування димових газів  $\gamma < 1,9 \%$ , для повітряного методу  $\gamma < 3,2 \%$ , а для методу байпасування  $\gamma < 5,2 \%$ . У разі металеві димові труби за значенням відносних витрат  $\gamma$  найбільшою ефективністю в цілому характеризується метод підсушування ( $\gamma < 7,2 \%$ ), дещо гірші показники має повітряний метод ( $\gamma < 13,5 \%$ ). Застосування ж методу часткового пропуску димових газів повз тепло утилізаційну систему за цих умов є практично неприйнятним через неприпустимо високі теплові витрати на його реалізацію.

### 2.3 Вихідні дані та методика розрахункових досліджень

Розрахунок охолодження відхідних газів в газовідвідних трактах та димовій трубі здійснювався за відомими методиками [67 – 72].

Необхідною умовою безпечної експлуатації газовідвідного тракту (за відсутності конденсатоутворення) було дотримання в гирлі димової труби умови  $t_{\text{пов}} \geq t_p$ .

Температура  $t_p$  точки роси розраховувалась за формулою

$$t_p = F(X) = 16,129 \ln \frac{X \cdot 10^3}{0,1 \cdot e^{-0,0193X_k} + 3,824}, \quad (2.2)$$

а температура  $t_{\text{пов}}$  поверхні в гирлі димової труби визначалась за виразом, отриманим із рівнянь теплопередачі та теплового балансу:

$$t_{\text{пов}} = \left[ t_{\Gamma}^{\text{см}} - \frac{Q_{\text{вт}}}{c_p^{\Gamma} G_{\Gamma}^{\text{сух}} (1 + X^{\text{см}})} \right] \cdot \left( 1 - \frac{K^{\text{гир}}}{\alpha_{\Gamma}^{\text{гир}}} \right) + \frac{t_{\Gamma}^{\text{гир}} K^{\text{гир}}}{\alpha_{\Gamma}^{\text{гир}}} - \Delta t_{\text{ох}}, \quad (2.3)$$

де  $Q_{\text{вт}}$  – теплові втрати ділянок тракту до димової труби:

$$Q_{\text{вт}} = \sum_{i=1}^n K_i F_i (t_{\Gamma i} - t_{\text{нсі}}), \quad (2.4)$$

Індекс  $i$  у (2.4) відповідає ділянці поверхні газоходу  $F_i$  з однаковим значенням температури навколишнього середовища  $t_{\text{нсі}}$ , коефіцієнтом теплопередачі  $K_i$  та середньою температурою газів  $t_{\Gamma i}$ .

Значення температури  $t_r^{cm}$ , вологості  $X^{cm}$  газової суміші у разі байпасування частини  $\chi$  димових газів при ізобарно-адіабатному змішуванні речовин визначалось з наступних співвідношень:

$$t_{ty} G_{ty} + t_{gr} G_{gr} = t_r^{cm} G^{cm}, \quad (2.5)$$

$$X_{ty} G_{ty} + X_k G_{gr} = X^{cm} G^{cm}. \quad (2.6)$$

Охолодження газів в результаті ізоентропічного розширення (внаслідок зміни термодинамічних процесів стану димових газів) розраховувалось виразом [72].

$$\Delta t_{ox} = (t_r^d + 273) \cdot \left( 1 - \frac{B_0 \exp(-g \rho_0^n H / B_0)}{B_0 + P_0^{ct}} \right)^{0,265}, \quad (2.7)$$

де  $t_r^d$  – температура газів на вході в димову трубу;  $B_0$  – барометричний тиск газів біля поверхні землі;  $P_0^{ct}$  – статичний тиск газів біля поверхні землі;  $g$  – прискорення земного тяжіння;  $H$  – висота труби;  $\rho_0^n$  – густина повітря біля поверхні землі.

Під час виконання розрахункових досліджень з визначення показників тепловологісного стану в гирлі розглянутих димових труб були прийняті такі допущення:

- режими експлуатації сміттєспалювальних установок відповідали тепловому графіку роботи систем опалення з розрахунковим перепадом температур 70-95°C, розрахункова температура для цієї системи становить -20 °C;
- сумарні теплові втрати на охолодження в газовідвідному тракті до димової труби приймались рівними 2 % теплового потенціалу димових газів на вході в димову трубу;
- значення швидкості газів на виході з гирла труби приймались близькими 10 м/с;

- для діапазону висот димових труб, що розглядались, не нехтувалось охолодженням газів в результаті ізоентропійного розширення.
- для запобігання конденсатоутворенню повинна дотримуватись умова перевищення на 2 - 3 °С температури внутрішньої поверхні над точкою роси:
- В розрахунках теплообміну в димових трубах не враховувалась запиленість газового потоку.

Досліджувався тепловологісний режим в гирлі димової труби – в останній самій вразливій до руйнування ланці газовідвідного тракту. Розглядалася труба висотою 120 м, зовнішнім діаметром 2,12 м та товщиною залізобетонної оболонки 0,16 м. При виконанні досліджень розглядалася вказана труба за наявності теплоізоляції її корпусу та без неї, а також за наявності вставного газовідвідного ствола та без нього (рис. 2.3).

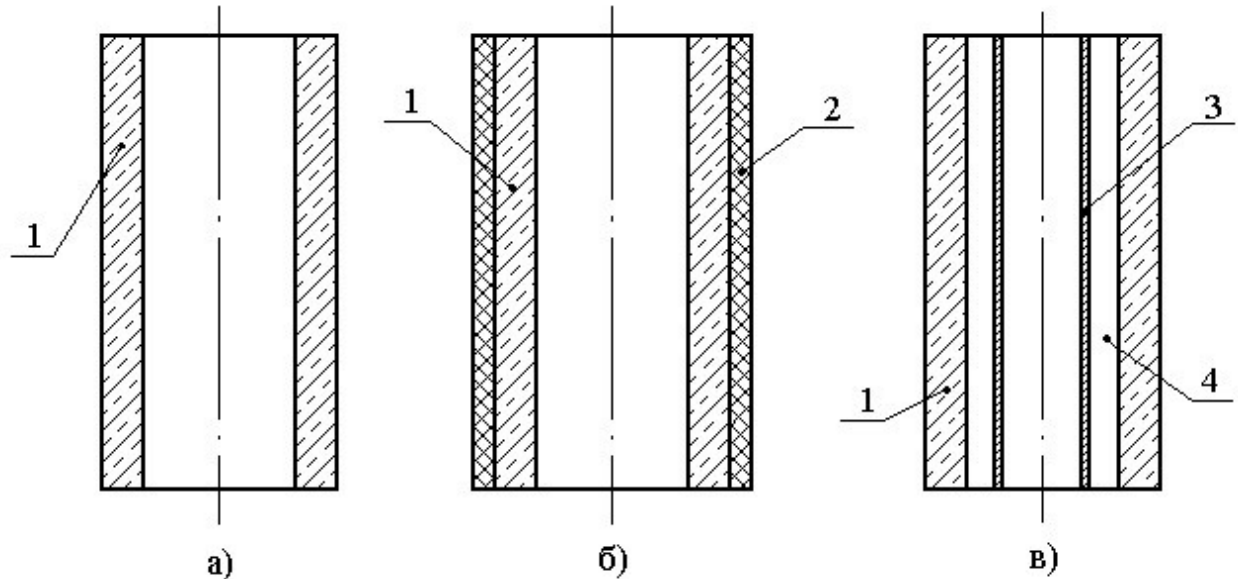


Рис. 2.3. Фрагменти димових труб:

- а) залізобетонна без футерування; б) залізобетонна з теплоізоляцією; в) залізобетонна з металевим стволом;  
 1 – залізобетон; 2 – повітряний прошарок; 3 – теплоізоляція.

Вибір димової труби для виконання розрахункових досліджень обґрунтовувався тим, що за результатами аналізу літературних джерел залізобетонні труби експлуатуються в найбільш раціональному висотному діапазоні (більше 90 м), який найбільш відповідає вимогам всіх екологічних стандартів експлуатації цих труб [33, 34]. Також залізобетонна димова труба вказаних розмірів застосовується на сміттєспалювальному заводі “Енергія” (м. Київ).

Для запобігання конденсатоутворенню в гирлі вказаних димових труб в дисертаційній роботі розглядалося застосування теплового методу зменшення втрат теплоти з поверхні корпусу труби, одиночних теплових методів тепловологісної обробки димових газів на виході з теплоутилізаційної системи. Це методи: підсушування димових газів у теплообміннику-газопідігрівачі, байпасування частини гарячих газів повз систему теплоутилізації, повітряний метод. Розглядалось також сумісне застосування двох обраних методів. Необхідною вимогою для експлуатації газовідвідних каналів (за відстності конденсатоутворення) включно з димовою трубою у разі застосування теплоутилізаційних технологій з глибоким охолодженням димових газів є як зазвичай виконання умови, за якої температура внутрішньої поверхні  $t_{\text{пов}}$  гирла димової труби повинна перевищувати точку роси  $t_r$  димових газів.

Розрахункові дослідження виконувались для установки з продуктивністю спалювання сміття 5 т/год. Установка призначена для використання теплоти згоряння ТПВ в котлі, що працює для потреб опалення. Установка оснащена комбінованою системою утилізації теплоти відхідних димових газів котла (рис. 2.1), де утилізована теплота використовується для попереднього нагрівання повітря на горіння та зворотної тепломережної води перед надходженням цих теплоносіїв до котла. Зокрема, як вже зазначалось, в теплоутилізаційній системі димові гази після сміттєспалювального агрегату надходять у повітрогрійний теплоутилізатор, в якому підігрівається дуттьове повітря, перед

надходженням його до котла. Частково охолоджені в повітрянагрівачі димові гази направляються у водогрійний теплоутилізатор, призначений для підігрівання зворотної води теплової мережі перед надходженням її на догрівання в сміттєспалювальний агрегат. Відносне теплове навантаження котла сміттєспалювальної установки в розрахункових дослідженнях змінювалось в діапазоні 100 – 40 % відповідно до зміни температури навколишнього середовища від -20 до +10 °С. Температура води в зворотній магістралі котельні та температура прямої води котла відповідали температурному графіку системи опалення з розрахунковою температурою навколишнього середовища -20 °С та перепадом температур теплоносія 25°С.

У водогрійному теплоутилізаторі в деяких режимах його роботи реалізовувалось глибоке охолодження димових газів (нижче температури точки роси водяної пари, що міститься в газах).

Вихідні параметри для виконання розрахунку теплообміну та гідродинаміки в запропонованій теплоутилізаційній системі наведено в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 Вихідні параметри

<b>Найменування характеристики, розмірність</b>	<b>Значення</b>
Витрата димових газів, кг/с	0,6 – 1,8
Вологовміст димових газів на виході з котла, кг/кг с.г.	0,15 – 0,20
Вологовміст димових газів на вході в димову трубу, кг/кг с.г.	0,95 – 0,20
Температура димових газів після котла, °С	200 – 250
Температура димових газів на вході в димову трубу, °С	52 – 84
Температура зворотної води системи опалення, °С	35 – 70
Температура води після водогрійного теплоутилізатора, °С	37,2 – 72,1
Температура повітря на вході у повітряогрійний теплоутилізатор, °С	-20 – 10
Температура повітря на виході з повітряогрійного теплоутилізатора, °С	137 – 197
Вологовміст нагрітого повітря, кг/кг с.г.	0,01

Вказані в таблиці характеристики прийняті з розрахунку на 1 т/год ТПВ і відповідають практичному діапазону цих величин при застосуванні технологій термічного знешкодження твердих побутових відходів.

Для визначення основних характеристик цієї системи використовувались відомі методи теплового розрахунку теплообмінних апаратів, котельних установок, методи математичного моделювання та дані експериментальних досліджень, отриманих авторами [70, 73-78].

В таблиці 2.2 наведено результати розрахунку характеристик димових газів після їх охолодження в комбінованій системі теплоутилізації в різних режимах експлуатації сміттєспалювальної установки протягом опалювального періоду.

Таблиця 2.2 Температура димових газів на виході з системи теплоутилізації (СТУ) в різних режимах її експлуатації

Вологовміст відхідних газів на вході в СТУ $X_{вх}^t$ , кг/кг с.г.	Температура газів $t_{вх}^t, ^\circ\text{C}$ на виході з СТУ за різних значень температури атмосферного повітря $t_{нс}, ^\circ\text{C}$ та температур димових газів на вході в СТУ $t_{вх}^t, ^\circ\text{C}$			
	-20	-10	0	10
$t_{вх}^t = 250$				
0,25	83,8	71,6	66,4	57,9
0,20	83,9	71,7	62,9	53,4
0,15	83,7	73,6	59,4	51,9
$t_{вх}^t = 200$				
0,25	77,5	68,4	66,3	59,0
0,20	77,4	67,1	62,7	54,5
0,15	77,4	68,4	58,9	52,4

Табл. 2.3 ілюструє результати розрахунку щодо характеристик нагріваного в повітрянагрівачі пропонованої системи теплоутилізації повітря.

Значення температур, вологовмістів та витрати димових газів, а також характеристики нагріваного повітря слугували вихідними параметрами в дослідженнях ефективності застосування теплових методів запобігання

конденсатоутворенню та їхніх комплексів в газовідвідних трактах сміттєспалювальної установки з системою теплоутилізації димових включно до гирла розглянутих димових труб.

Таблиця 2.3 Температура нагрітого повітря в різних режимах експлуатації системи теплоутилізації (СТУ)

Вологовміст димових газів на вході в СТУ $X_{\text{вх}}^{\Gamma}$ , кг/кг с.г.	Температура $t_{\text{вих}}^{\text{п}}, ^{\circ}\text{C}$ , нагрітого в повітрянагрівачі СТУ, за різних значень температури атмосферного повітря $t_{\text{нс}}, ^{\circ}\text{C}$ та температур димових газів на вході в СТУ, $^{\circ}\text{C}$			
	-20	-10	0	10
$t_{\text{вх}}^{\Gamma} = 250$				
0,25	171,6	178,4	186,4	196,5
0,20	172,3	178,9	186,9	196,9
0,15	171,6	178,9	186,9	196,9
$t_{\text{вх}}^{\Gamma} = 200$				
0,25	137,6	143,7	150,5	159,0
0,20	137,4	143,4	150,3	158,8
0,15	137,4	143,4	150,3	158,8

## ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2

1. Проаналізовано особливості застосування для сміттєспалювальних установок заходів та методів щодо антикорозійного захисту газовідвідних трактів шляхом запобігання в них конденсатоутворенню при використанні теплоутилізаційних технологій з глибоким охолодженням продуктів згоряння.

2. Висвітлено принципові положення застосовуваної методики щодо визначення характеристик тепловологісного стану в димових трубах сміттєспалювальної установки при застосуванні розглянутих теплових методів відвернення конденсатоутворення в гирлі досліджуваних димових труб.

3. Запропоновано комбіновану систему глибокої рекуперації скидних димових газів сміттєспалювальної установки та визначено вихідні параметри для виконання розрахункових досліджень щодо визначення тепловологісних показників в гирлі розглянутих димових труб за умов застосування цієї системи.

### **РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ ТЕПЛОВОЛОГІСНОГО РЕЖИМУ В ДИМОВИХ ТРУБАХ ЗА УМОВ ЗАСТОСУВАННЯ ТЕПЛОВИХ МЕТОДІВ ТЕПЛОВОЛОГІСНОЇ ОБРОБКИ ДИМОВИХ ГАЗІВ ПІСЛЯ ТЕПЛОУТИЛІЗАЦІЇ ДЛЯ ЗАПОБІГАННЯ КОНДЕНСАТОУТВОРЕННЮ В ГАЗОВІДВІДНИХ ТРАКТАХ**

Явище конденсатоутворення на внутрішній поверхні корпусу димової труби, спостерігається, як зазначалось у розділі 1, у разі відхилення режимів експлуатації цих споруд від нормативних. До таких відхилень зазвичай належить використання сучасних теплоутилізаційних технологій [60 – 65].

В даному розділі розглядаються результати досліджень щодо ефективності використання для теплового захисту димових труб від корозійного та ерозійного зношування заходів, пов'язаних зі зміною тепловологісних характеристик димових газів за теплоутилізаційною системою, перед надходженням до димової труби.

#### **3.1 Тепловологісні показники в димовій трубі сміттєспалювальної установки без застосування системи теплоутилізації димових газів та за її наявності**

Розглянемо, насамперед, показники тепловологісного стану, точку роси  $t_p$  та температуру внутрішньої  $t_{пов}$  поверхні, в гирлі димової труби лише з залізобетонною оболонкою за різних режимів експлуатації водогрійного сміттєспалювального агрегату (рис.3.1) без використання теплоутилізаційних технологій.

На рис. 3.2 наведено відповідні результати. Як видно з наведених графіків, тепловологісний режим експлуатації в гирлі залізобетонної димової труби за розглянутих умов відповідає відсутності конденсатоутворення, оскільки в усіх досліджуваних режимах дотримується перевищення температури поверхні  $t_{пов}$  над точкою роси  $t_p$  в самій вразливій ділянці труби – її гирлі.

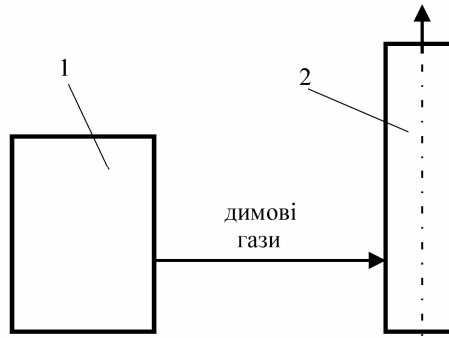


Рис. 3.1. Сміттєспалювальна установка без системи теплоутилізації та систем теплового захисту газовідвідних трактів:  
1 – сміттєспалювальний агрегат; 2 – димова труба.

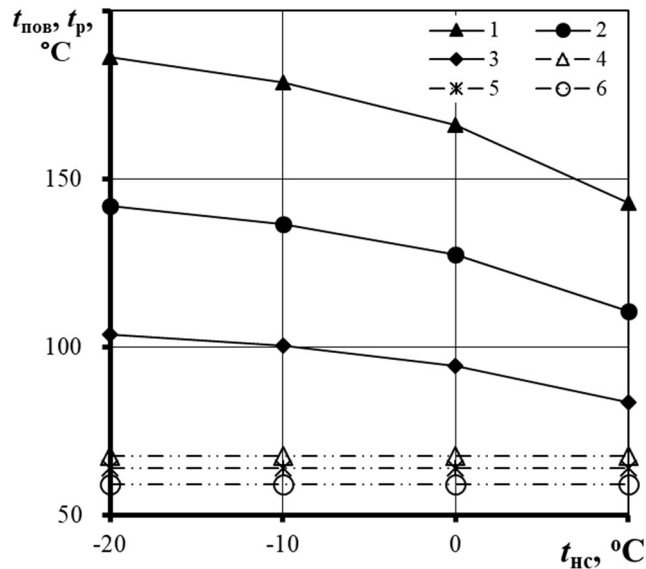


Рис. 3.2. Залежність від температури навколишнього середовища  $t_{нс}$  температури внутрішньої поверхні  $t_{пов}$  в гирлі димової труби (1-3) і точки роси  $t_p$  (4-6) за різних температур  $t_{вх}^r$  та вологовмісту  $X_{вх}$  відхідних газів сміттєспалювального агрегату без застосування систем теплоутилізації:

$$1 - t_{вх}^r = 250 \text{ } ^\circ\text{C}; 2 - t_{вх}^r = 200 \text{ } ^\circ\text{C}; 3 - t_{вх}^r = 150 \text{ } ^\circ\text{C}; 3 - X_{вх} = 0,25 \text{ кг/кг с.г.};$$

$$4 - X_{вх} = 0,20; 3 - X_{вх} = 0,15.$$

Проаналізуємо закономірності зміни досліджуваних тепловологісних показників  $t_{пов}$  та  $t_p$  за умов встановлення в хвостовій частині водогрійного

сміттєспалювального агрегату пропонуваної комбінованої системи теплоутилізації його відхідних газів (рис. 3.2). За результатами виконаних теплових розрахунків використання вказаної системи за глибиною охолодження димових газів відповідає підвищенню ефективності використання палива в котлах на 5 – 8 %.

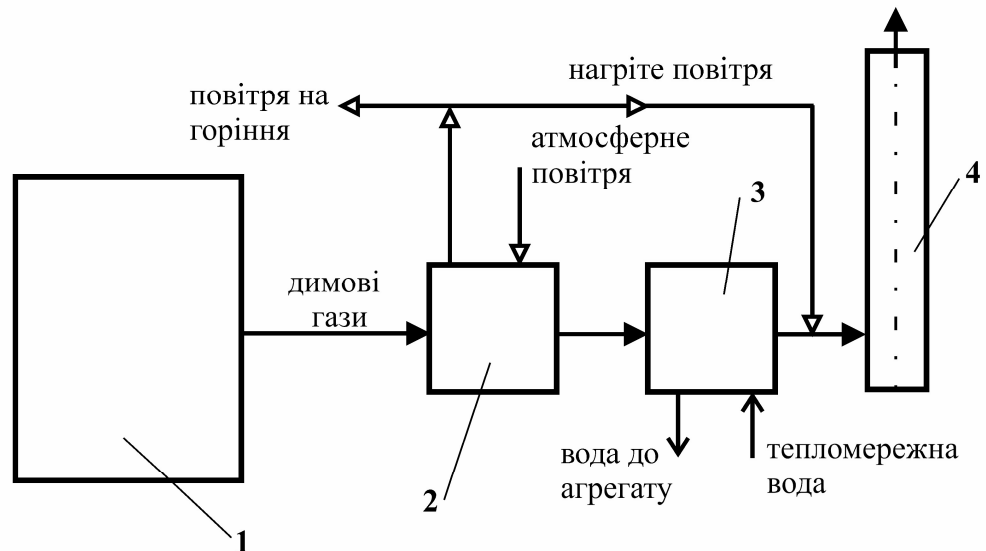


Рис. 3.2. Схема сміттєспалювальної установки з комбінованою системою теплоутилізації без застосування заходів щодо захисту димової труби:

1 – сміттєспалювальний агрегат; 2 – теплоутилізатор-повітрянагрівач; 3 – теплоутилізатор-водопідігрівач; 4 – димова труба без теплоізоляції.

Отримані результати щодо тепловологісного режиму (рис. 3.3) в гирлі досліджуваної труби свідчать, що в усіх режимах експлуатації сміттєспалювальної установки не дотримується умова  $t_{\text{пов}} > t_r$ . Ця обставина зумовлює конденсацію в цій трубі, яке викликає її корозійне зношування. Випадення конденсату викликано значним зниженням температури відхідних газів в застосовуваній комбінованій системі теплоутилізації.

Отже, застосування теплоутилізаційних технологій окрім позитивного ефекту щодо підвищення ефективності спалювання палива має негативний ефект, а саме – погіршує тепловологісні умови експлуатації в газівідвідних

трактах, що є особливо небезпечним для димових труб. Тому застосування ефективних систем рекуперації скидної теплоти сміттєспалювальних установок потребує спеціальних заходів щодо захисту димових труб від корозійного руйнування внаслідок конденсатоутворення.

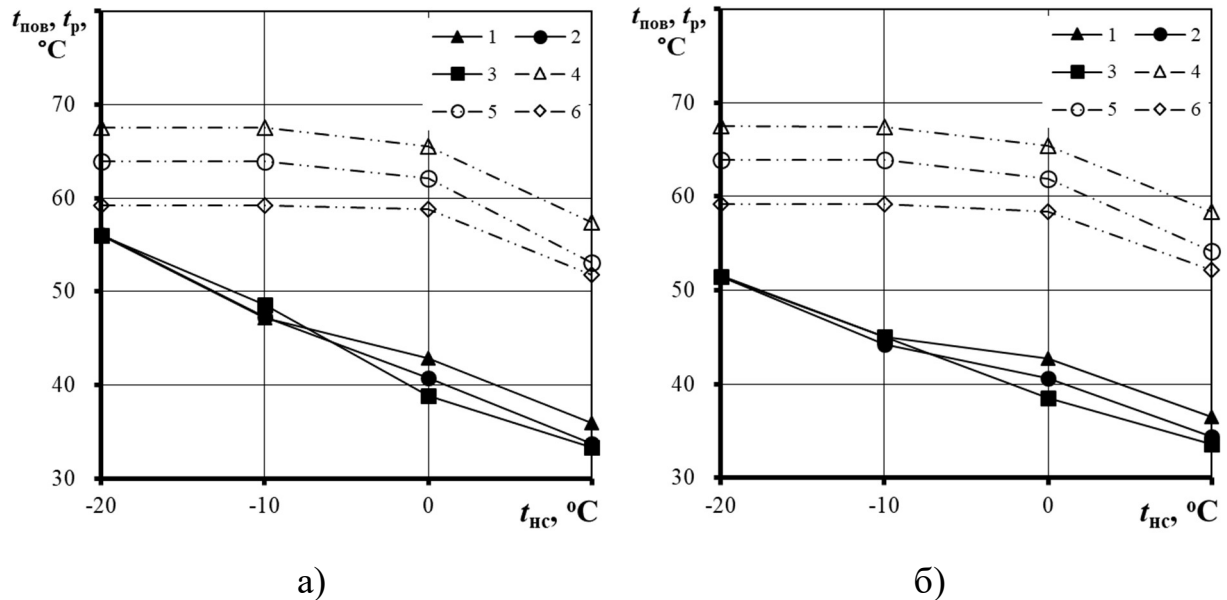


Рис. 3.3. Залежність від температури навколишнього середовища  $t_{nc}$  температури внутрішньої поверхні  $t_{пов}$  в гирлі димової труби (1-3) і точки роси  $t_p$  (4-6) за різних температур  $t_{вх}^r$  і вологовмісту  $X_{вх}$  димових газів після сміттєспалювального агрегату у разі застосування систем теплоутилізації:

а)  $t_{вх}^r = 250$  °C; б)  $t_{вх}^r = 200$  °C;

1, 4 –  $X_{вх} = 0,25$  кг/кг с.г.; 2, 5 –  $X_{вх} = 0,20$ ; 3, 6 –  $X_{вх} = 0,15$ .

### 3.2 Ефективність застосування теплового методу байпасування димових газів

Розглянемо використання у разі застосування запропонованої комбінованої системи теплоутилізації для покращення режимів експлуатації газовідвідних трактів включно до гирла димової труби одного з найпоширеніших методів тепловологісної обробки димових газів після теплоутилізації – методу байпасування. Вказаний метод полягає в пропусканні частини  $\chi$  гарячих газів від сміттєспалювального агрегату повз систему теплоутилізації з наступним їх змішуванням з газами, що охололи у цій системі. За цих умов підвищується температура суміші газів  $t_{см}$  на вході у

газовідвідний тракт та температура точки роси в режимах глибокого охолодження димових газів в системах теплоутилізації. Умова  $t_{\text{пов}} \geq t_p$  за таких обставин може дотримуватися завдяки підвищенню температури суміші газів на вході в димову трубу до такого рівня, що забезпечує перевищення температури поверхні  $t_{\text{пов}}$  над температурою  $t_p$  точки роси в гирлі димової труби.

На рис. 3.4. подано принципову схему із застосуванням вказаного теплового методу та комбінованої системи теплоутилізації.

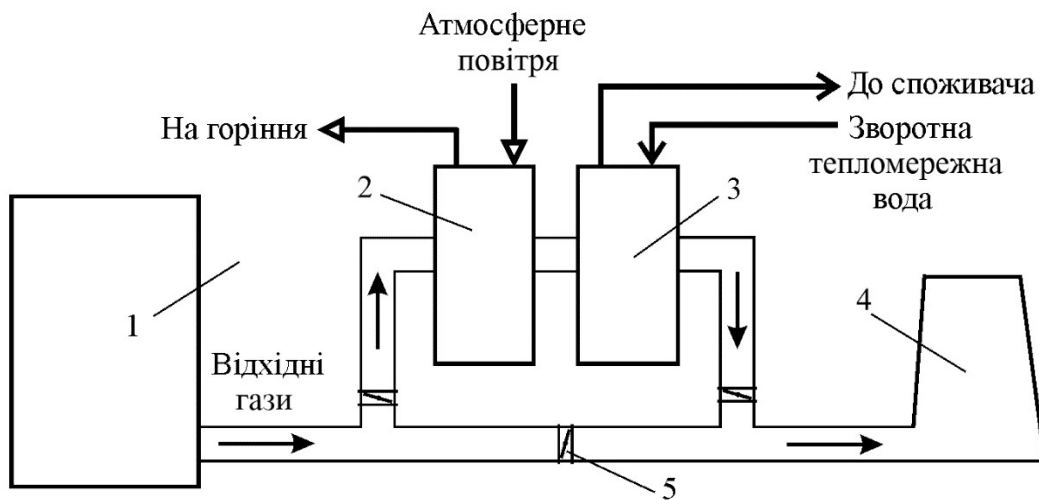


Рис. 3.4. Застосування методу байпасування для запобігання конденсатоутворенню в газовідвідному тракті установки спалювання палив з ТПВ з комбінованою системою теплоутилізації:

1 – водогрійний сміттєспалювальний агрегат; 2 – повітрянагрівач; 3 – водопідігрівач; 4 – димова труба; 5 – регулювальний клапан.

Результати розрахункових досліджень щодо ефективності використання методу байпасування для відвернення конденсатоутворення в залізобетонній димовій трубі за різних температур та вологовмісту газів за сміттєспалювальним агрегатом при зміні частки байпасування  $\chi$  в межах 0 – 50 % наведено на рис. 3.5, 3.6.

Наведені рисунки ілюструють закономірності зміни тепловологісних показників (температури поверхні  $t_{\text{пов}}$  та точки роси  $t_p$ ) в гирлі досліджуваної димової труби в різних режимах сміттєспалювальної установки протягом

опалювального періоду. Як видно з наведених результатів, метод байпасування за досліджуваних умов не дає позитивного результату в усіх розглянутих режимах установки з системою теплоутилізації відхідних газів. Так в гирлі димової труби не реалізується дотримання необхідної умови перевищення температури поверхні  $t_{\text{пов}}$  над точкою роси  $t_p$ . Навпаки, точка роси  $t_p$  є вищою за температуру поверхні  $t_{\text{пов}}$  на 2 – 20 °С в залежності від режиму експлуатації установки, температури  $t_{\text{вх}}^r$  та вологовмісту  $X_{\text{вх}}$  димових газів на вході в теплоутилізаційну систему і частки байпасування газів  $\chi$ . І значення  $(t_p - t_{\text{пов}})$  є тим більшим, чим нижче значення  $t_{\text{вх}}^r$  вище  $X_{\text{вх}}$ , нижча температура навколишнього середовища та більша частка байпасування  $\chi$ .

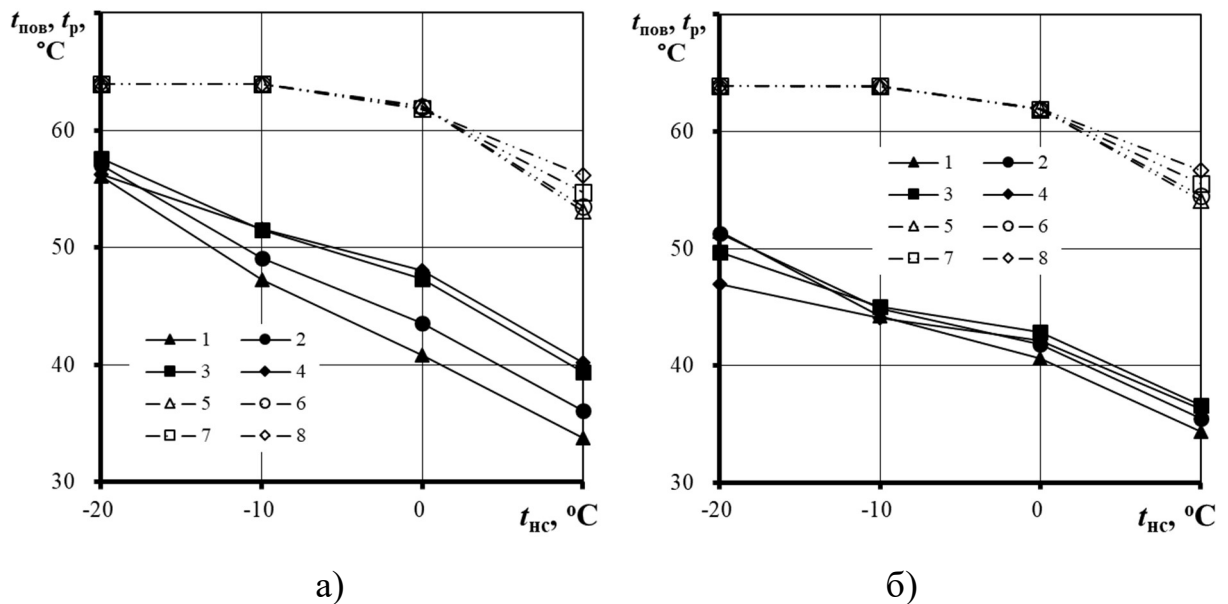


Рис. 3.5. Залежність від температури навколишнього середовища  $t_{\text{нс}}$  температури внутрішньої поверхні  $t_{\text{пов}}$  в гирлі димової труби (1-4) і точки роси  $t_p$  (5-8) за різних температур димових газів  $t_{\text{вх}}^r$  та вологовмісту  $X_{\text{вх}} = 0,20$  кг/кг с.г. на вході в СТУ за часток байпасування  $\chi$ :

а)  $t_{\text{вх}}^r = 250$  °С; б)  $t_{\text{вх}}^r = 200$  °С; 1,5 –  $\chi = 0\%$ ; 2,6 –  $10\%$ ; 3,7 –  $30\%$ ; 4,8 –  $50\%$ .

Отримані результати є очікуваними, оскільки метод байпасування характеризується високою ефективністю для димових труб з хорошими теплоізоляційними властивостями, за високих температур  $t_{\text{вх}}^r$  димових газів за сміттєспалювальним агрегатом (тобто на вході в СТУ) та відносно низьких

значень їх вологовмісту  $X_{\text{вх}}$ . Причому значення вологовмісту  $X_{\text{вх}}$  відіграє значну роль, бо підмішування байпасованих газів з високим вологовмістом у вихідні гази після водогрійного теплоутилізатора збільшує вологовміст суміші, а відтак і точку роси цієї суміші.

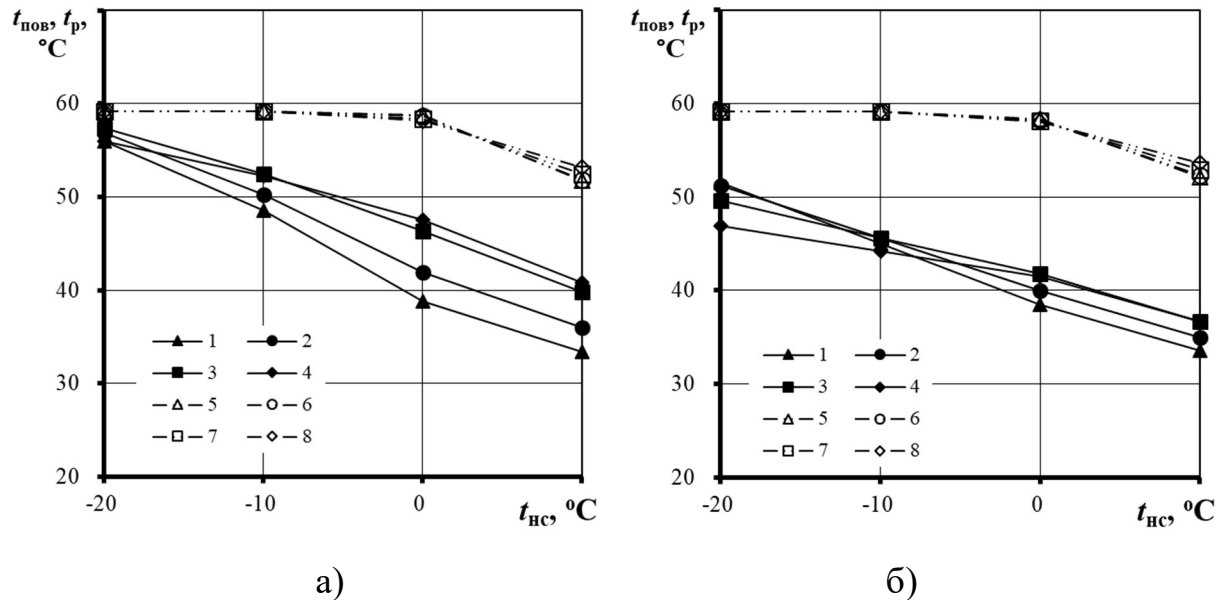


Рис. 3.6. Залежність від температури навколишнього середовища  $t_{\text{нс}}$  температури внутрішньої поверхні  $t_{\text{пов}}$  в гирлі димової труби (1-4) і точки роси  $t_{\text{р}}$  (5-8) за різних температур димових газів  $t_{\text{вх}}^{\text{r}}$  та вологовмісту  $X_{\text{вх}} = 0,15$  кг/кг с.г на вході в СТУ за часток байпасування  $\chi$ :  
 а)  $t_{\text{вх}}^{\text{r}} = 250$  °C; б)  $t_{\text{вх}}^{\text{r}} = 200$  °C; 1,5 –  $\chi = 0\%$ ; 2,6 –  $10\%$ ; 3,7 –  $30\%$ ; 4,8 –  $50\%$ .

На рис. 3.7 наведено результати розрахункових досліджень щодо відносних витрат теплоти (див. формулу 3.9) на реалізацію теплового методу байпасування. Як свідчать отримані результати досліджень, вказаний метод потребує значних витрат теплоти на його використання. Ці витрати досягають за розглянутих часток байпасування гарячих газів (до 50 %) більше 40% можливого обсягу утилізованої теплоти (за відсутності байпасування). І навіть за таких великих витрат використання методу байпасування не забезпечує позитивного результату в плані відсутності конденсатоутворення в гирлі досліджуваної залізобетонної димової труби.

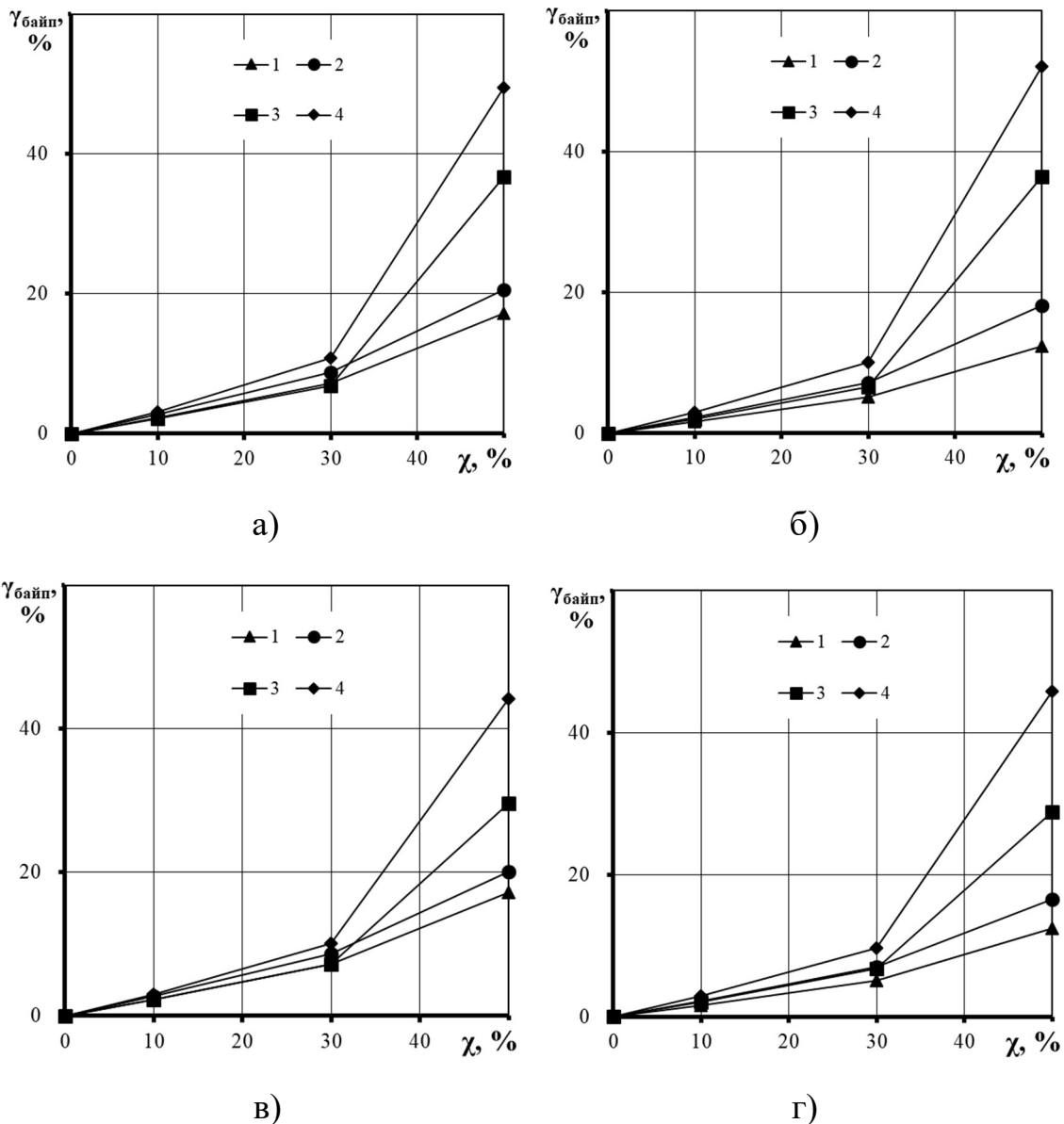


Рис. 3.7. Залежність коефіцієнта відносних витрат теплоти  $\gamma_{байп}$  на реалізацію теплового методу байпасування газів від частки байпасування  $\chi$  за різних температур  $t_{вх}^r$  та вологовмісту  $X_{вх}^r$  димових газів на вході в СТУ:

а)  $t_{вх}^r = 250$  °C;  $X_{вх}^r = 0,20$ ; б)  $t_{вх}^r = 200$  °C;  $X_{вх}^r = 0,20$ ; в)  $t_{вх}^r = 250$  °C;  $X_{вх}^r = 0,15$ ; г)  $t_{вх}^r = 200$  °C;  $X_{вх}^r = 0,15$ ;

1 – при  $t_{нс} = -20$  °C; 2 –  $-10$  °C; 3 –  $0$  °C; 4 –  $10$  °C.

За результатами виконаних досліджень можна зробити висновок про недоцільність застосування методу байпасування для запобігання конденсатоутворенню в досліджуваній димовій трубі розглянутої в роботі

сміттєспалювальної установки з комбінованою системою теплоутилізації через великі витрати теплоти на використання методу.

### **3.3 Особливості використання методу підсушування охолоджених газів у газопідігрівачі**

Метод запобігання конденсатоутворенню у відповідних газоходах паливоспоживальних установок шляхом підсушування охолоджених в системі теплоутилізації димових газів полягає в нагріванні цих газів у поверхневому теплообміннику, встановленому за теплоутилізаторами використовуваної системи теплоутилізації (перед надходженням до димової труби). Застосування додаткової поверхні нагрівання (газопідігрівача) слугує для збільшення температури газів на виході з теплоутилізаційної системи  $t_{\text{ТУ}}$  до рівня, що забезпечує таке підвищення  $t_{\text{пов}}$  в гирлі димової труби, яке відповідає її перевищенню над точкою роси  $t_{\text{р}}$  при сталому значенні абсолютної вологості вихідних димових газів. Підвищення  $t_{\text{ТУ}}$  може здійснюватись за рахунок теплоти прямої води водогрійного агрегату сміттєспалювальної установки або димових газів, відібраних перед повітрянагрівачем теплоутилізаційної системи. На рис. 3.8 наведено принципову схему сміттєспалювальної установки із застосуванням вказаного теплового методу.

За цією схемою тепловологісна обробка димових газів після теплоутилізаційної системи здійснюється шляхом їх підсушування у теплообміннику- газопідігрівачі завдяки підігріванню охолоджених газів до  $0 - 30^{\circ}\text{C}$  прямою водою котла.

Результати розрахункових досліджень щодо ефективності застосування досліджуваного методу для запобігання конденсатоутворенню в газовідвідному тракті включно до гирла димової труби наведено на рис. 3.9, 3.10.

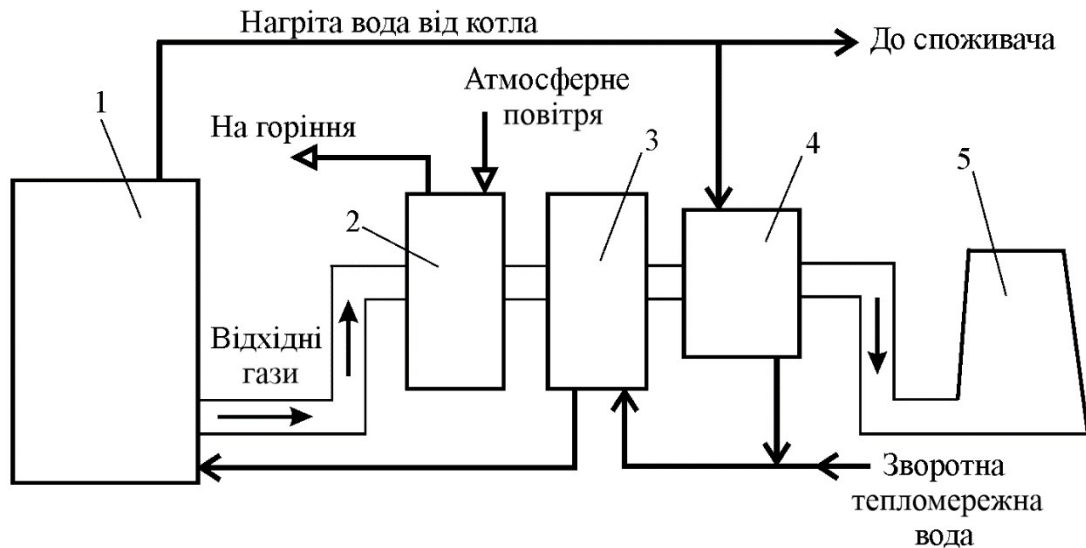


Рис. 3.8. Застосування методу підсушування для запобігання конденсатоутворенню в газовідвідному тракті установки спалювання палив з ТПВ з комбінованою системою теплоутилізації:

1 – водогрійний сміттєспалювальний агрегат; 2 – повітрянагрівач; 3 – водопідігрівач; 4 – газопідігрівач; 5 – димова труба.

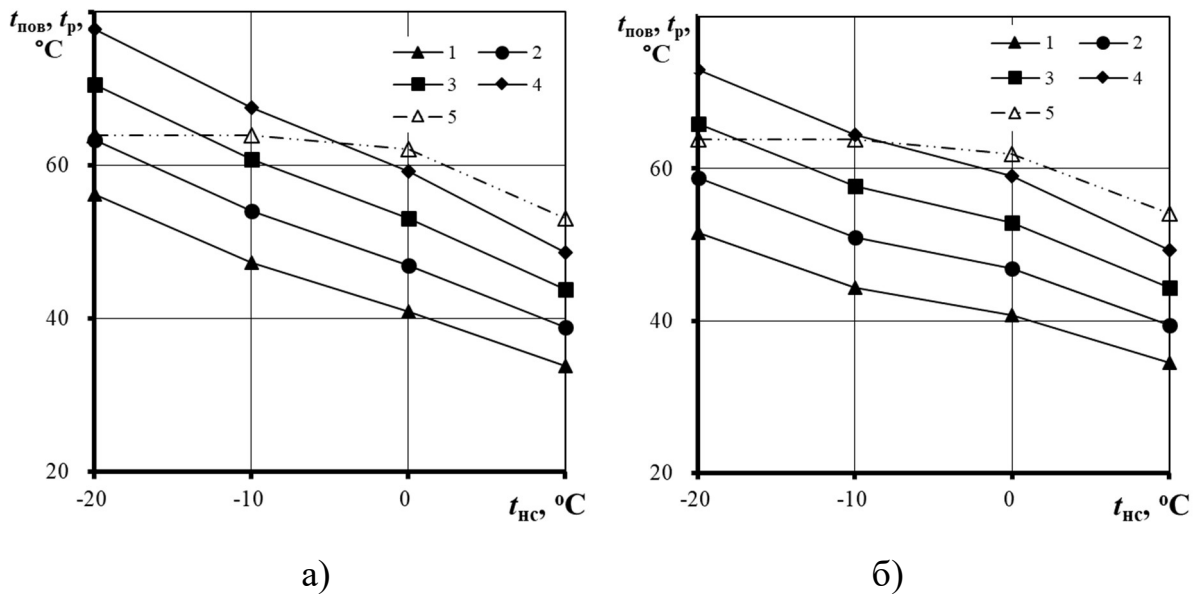


Рис. 3.9. Залежність від температури навколишнього середовища  $t_{нс}$  температури внутрішньої поверхні  $t_{пов}$  в гирлі димової труби (1-4) і точки роси  $t_p$  (5) за різних температур димових газів  $t_{вх}^Г$  та вологовмісту  $X_{вх} = 0,20$  кг/кг с.г. на вході в СТУ та величини підігрівання охолоджених газів  $\Delta t$ :

а)  $t_{вх}^Г = 250$  °C;

б)  $t_{вх}^Г = 200$  °C; 1 –  $\Delta t = 0$  °C; 2 – 10 °C; 3 – 20 °C; 4 – 30 °C.

Аналіз отриманих результатів досліджуваних тепловологісних показників (температури поверхні  $t_{\text{пов}}$  та точки роси  $t_p$ ) в гирлі залізобетонної димової труби свідчить, що метод підсушування є більш результативним, ніж метод байпасування.

За результатами досліджень, в деяких режимах реалізується перевищення температури поверхні  $t_{\text{пов}}$  над точкою роси  $t_p$ . І це має місце лише за великих теплових навантажень сміттєспалювального агрегату, що працює для потреб системи опалення. Ці навантаження відповідають низьким температурам навколишнього середовища ( $t_{\text{НС}} < -5^{\circ}\text{C}$ ), високим температурам газів на виході з сміттєспалювального агрегату ( $t_{\text{вх}}^{\text{Г}} > 200^{\circ}\text{C}$ ) та рівнів підігрівання охолоджених газів у газопідігрівачі  $\Delta t$ , що повинні здебільшого перевищувати  $30^{\circ}\text{C}$ . При  $\Delta t = 20^{\circ}\text{C}$  безпечний режим експлуатації труби може реалізуватись лише в режимах роботи вказаного агрегату, близьких до номінальних.

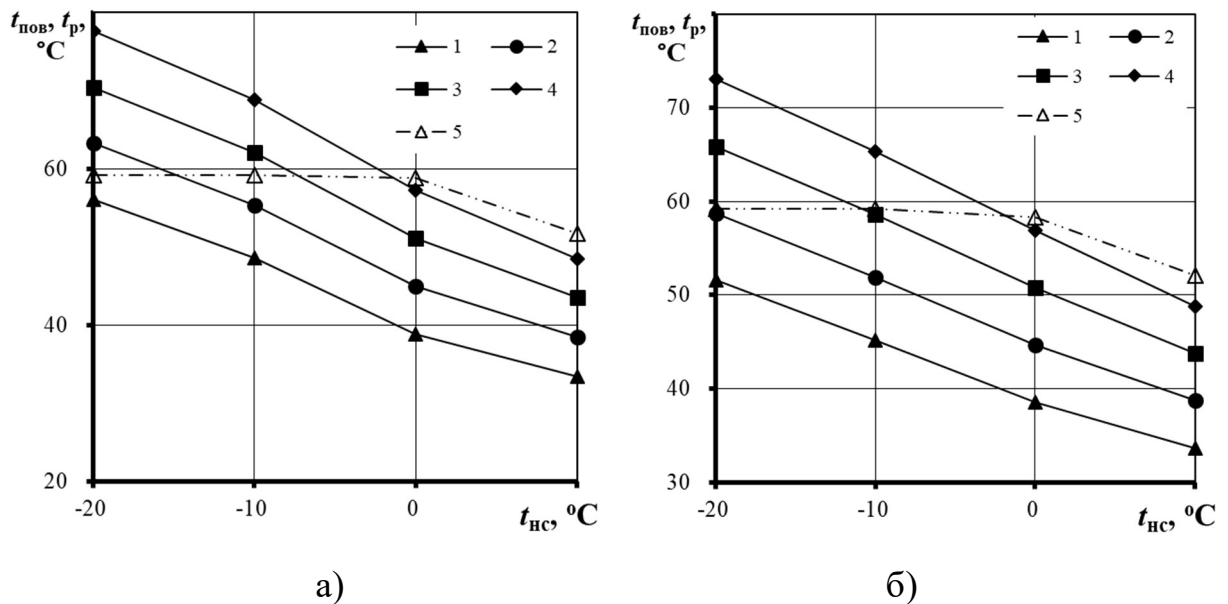


Рис. 3.10. Залежність від температури навколишнього середовища  $t_{\text{НС}}$  температури внутрішньої поверхні  $t_{\text{пов}}$  в гирлі димової труби (1-4) і точки роси  $t_p$  (5) за різних температур димових газів  $t_{\text{вх}}^{\text{Г}}$  та вологовмісту  $X_{\text{вх}} = 0,15$  кг/кг с.г на вході в СТУ та величини підігрівання охолоджених газів  $\Delta t$ :

а)  $t_{\text{вх}}^{\text{Г}} = 250^{\circ}\text{C}$ ;

б)  $t_{\text{вх}}^{\text{Г}} = 200^{\circ}\text{C}$ ; 1 –  $\Delta t = 0^{\circ}\text{C}$ ; 2 –  $10^{\circ}\text{C}$ ; 3 –  $20^{\circ}\text{C}$ ; 4 –  $30^{\circ}\text{C}$ .

Щодо рівнів витрат теплоти  $\gamma_{\text{підс}}$  на реалізацію методу підсушування (рис. 3.11), то ці рівні є меншими у порівнянні з методом байпасування.

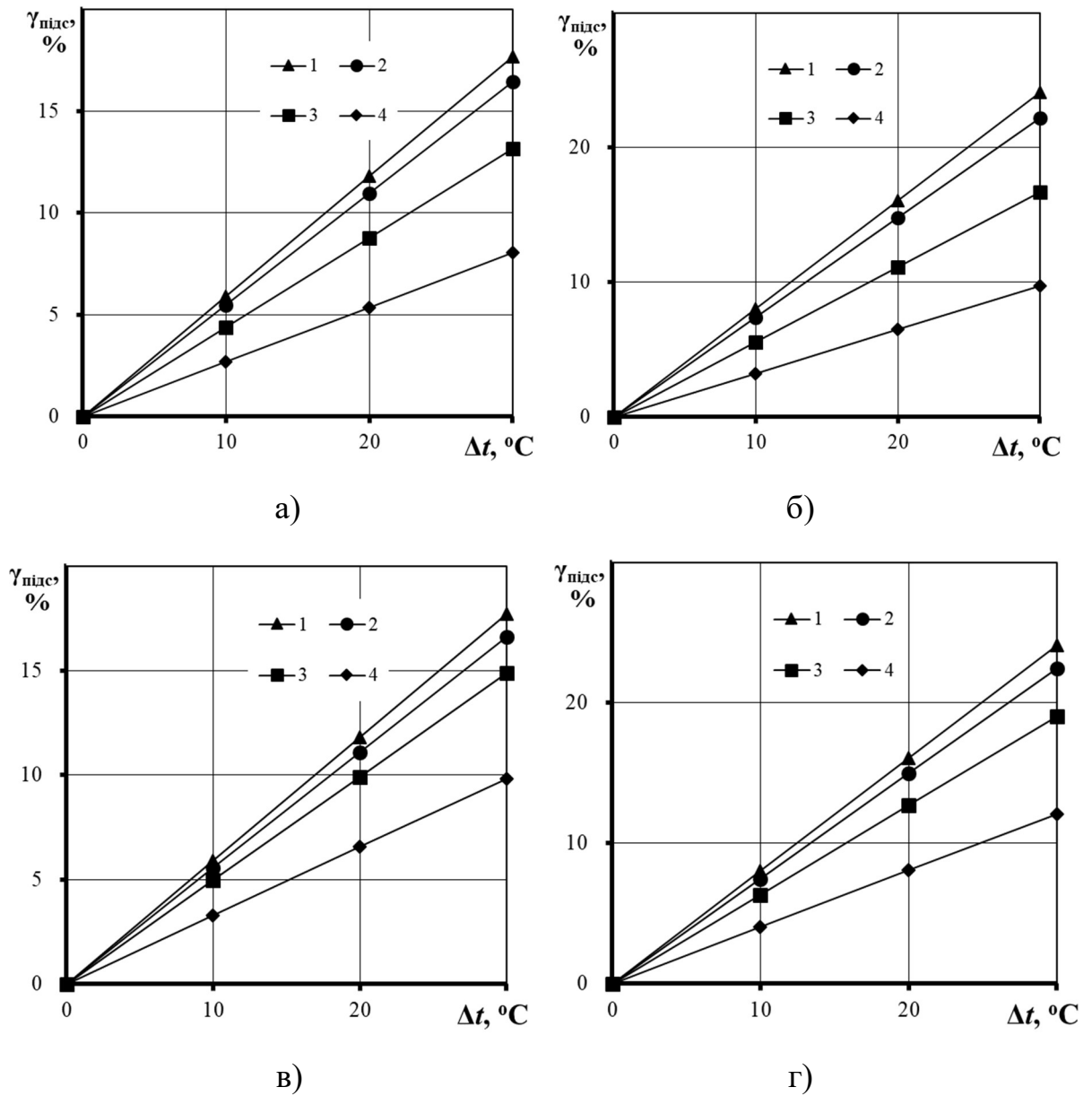


Рис. 3.11. Залежність коефіцієнта відносних витрат теплоти  $\gamma_{\text{підс}}$  на реалізацію теплового методу підсушування відхідних газів від величини підігрівання  $\Delta t$  за різних температур  $t_{\text{вх}}^r$  та вологовмісті димових газів на вході в СТУ:

а)  $t_{\text{вх}}^r = 250\text{ }^\circ\text{C}; X_{\text{вх}}^r = 0,20$ ; б)  $t_{\text{вх}}^r = 200\text{ }^\circ\text{C}; X_{\text{вх}}^r = 0,20$ ; в)  $t_{\text{вх}}^r = 250\text{ }^\circ\text{C}; X_{\text{вх}}^r = 0,15$ ; г)  $t_{\text{вх}}^r = 200\text{ }^\circ\text{C}; X_{\text{вх}}^r = 0,15$ ;

1 – при  $t_{\text{нс}} = -20\text{ }^\circ\text{C}$ ; 2 –  $-10\text{ }^\circ\text{C}$ ; 3 –  $0\text{ }^\circ\text{C}$ ; 4 –  $10\text{ }^\circ\text{C}$ .

Згідно з отриманими результатами максимальне значення коефіцієнта  $\gamma_{\text{підс}}$  не перевищує значення 25 %. І це значення тим менше, чим менший рівень  $\Delta t$  підігрівання газів, вищі температура  $t_{\text{вх}}^f$  газів та вологовміст  $X_{\text{вх}}$  на вході в теплоутилізаційну систему і нижча температура навколишнього середовища.

Узагальнюючи результати виконаних досліджень щодо ефективності застосування методу підсушування димових газів після системи теплоутилізації, можна стверджувати, що за розглянутих умов цей метод не забезпечує запобігання конденсатоутворенню в розглянутій димовій трубі у переважній більшості режимів роботи опалювальної сміттєспалювальної установки протягом періоду її експлуатації.

### **3.4 Закономірності зміни основних тепловологісних характеристик в димовій трубі у разі реалізації повітряного методу**

Наступним методом, що сприяє відверненню конденсатоутворення в газовідвідному тракті паливоспоживальної установки з системою теплоутилізації, є повітряний метод. У разі застосування цього методу відбувається підмішування в гази після теплоутилізаційної системи частки  $\sigma$  нагрітого повітря, що зумовлює зниження вологовмісту суміші охолоджених газів і повітря, а також підвищення температури цієї суміші перед надходженням її у димову трубу. Частка  $\sigma$  є відношенням обсягу підмішаного повітря до обсягу димових газів  $\sigma = G_{\text{гт}}/G_{\text{гт}}$ . Схема застосування повітряного методу наведена на рис. 3.12.

В наведеній схемі реалізація повітряного методу забезпечується завдяки додаванню в газовідвідний тракт після водогрійного теплоутилізатора повітря, нагрітого в повітрогрійному теплоутилізаторі системи теплоутилізації.

Дотримання умови  $t_{\text{пов}} \geq t_p$  у разі застосування даного методу забезпечується і завдяки підвищенню  $t_{\text{пов}}$ , що досягається збільшенням температури суміші димових газів при підмішуванні нагрітого повітря, і

завдяки зменшенню точки роси  $t_p$  шляхом додавання повітря з низькою вологістю ( $< 0,01$  кг/кг с.п.). Для виконання досліджень щодо ефективності повітряного методу використовувались розрахункові значення температур підмішуваного повітря (табл. 2.3), нагрітого в повітряонагрівачі теплоутилізаційної системи, в залежності від режиму роботи сміттєспалювального агрегату.

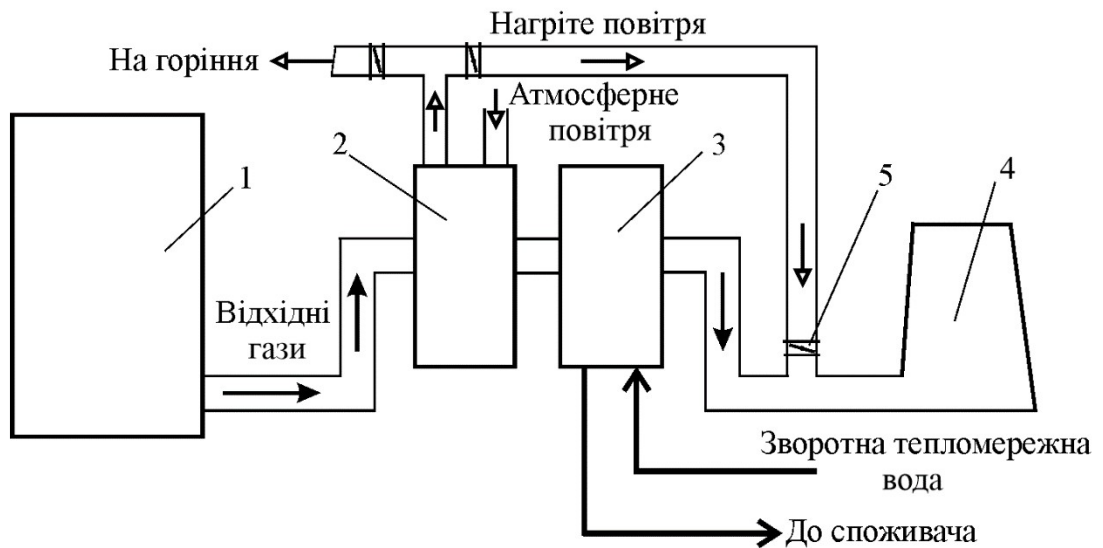


Рис. 3.12. Застосування повітряного методу для запобігання конденсатоутворенню в газовідвідному тракті установки спалювання палив з ТПВ з комбінованою системою теплоутилізації:

- 1 – водогрійний сміттєспалювальний агрегат; 2 – повітряонагрівач; 3 – водопідігрівач; 4 – димова труба; 5 – регулювальний клапан.

Результати розрахунків досліджуваних тепловологісних показників  $t_{пов}$  та  $t_p$  в гирлі розглянутої димової труби та відносних витрат теплоти на застосування повітряного методу подано на рис. 3.13-3.15. Аналіз наведених результатів свідчить, що у разі використання одиночного повітряного методу в сміттєспалювальних установках з водогрійним опалювальним агрегатом запобігання конденсатоутворенню за часток підмішування  $\sigma$  до 30 % реалізується лише в режимах роботи цього агрегату, близьких до номінальних, які відповідають низьким температурам навколишнього середовища.

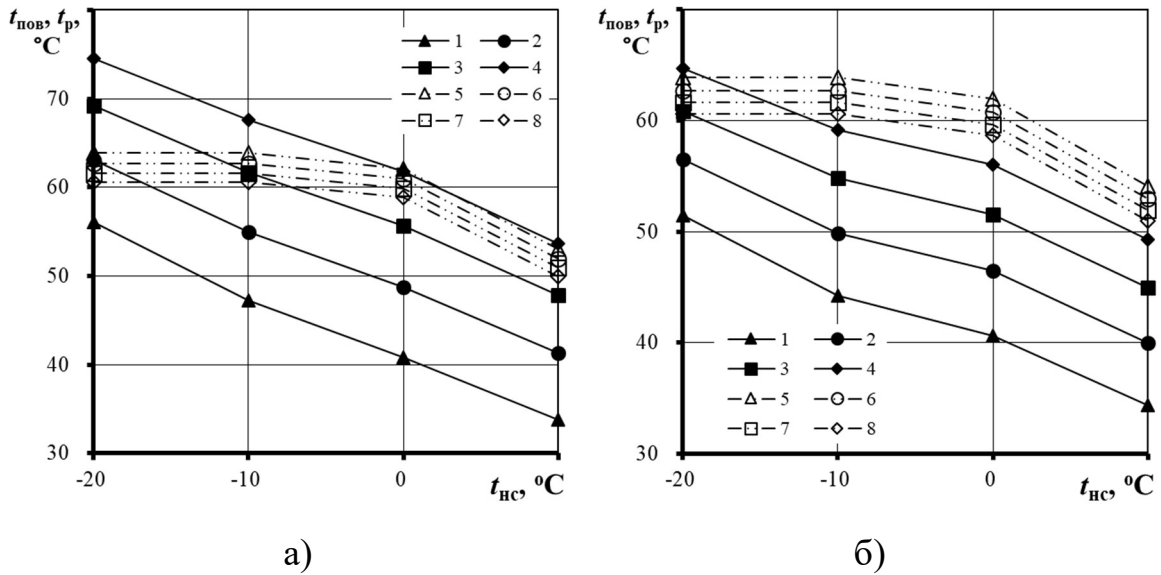


Рис. 3.13. Залежність від температури навколишнього середовища  $t_{нс}$  температури внутрішньої поверхні  $t_{пов}$  в гирлі димової труби (1-4) і точки роси  $t_p$  (5-8) за різних температур  $t_{вх}^r$  та вологовмісту 0,20 кг/кг с.г. димових газів на вході в СТУ та частки підмішуваного повітря  $\sigma$ :

а)  $t_{вх}^r = 250 \text{ }^\circ\text{C}$ ;

б)  $t_{вх}^r = 200 \text{ }^\circ\text{C}$ ; 1,5 –  $\sigma = 0\%$ ; 2,6 – 10%; 3,7 – 20%; 4,8 – 30%.

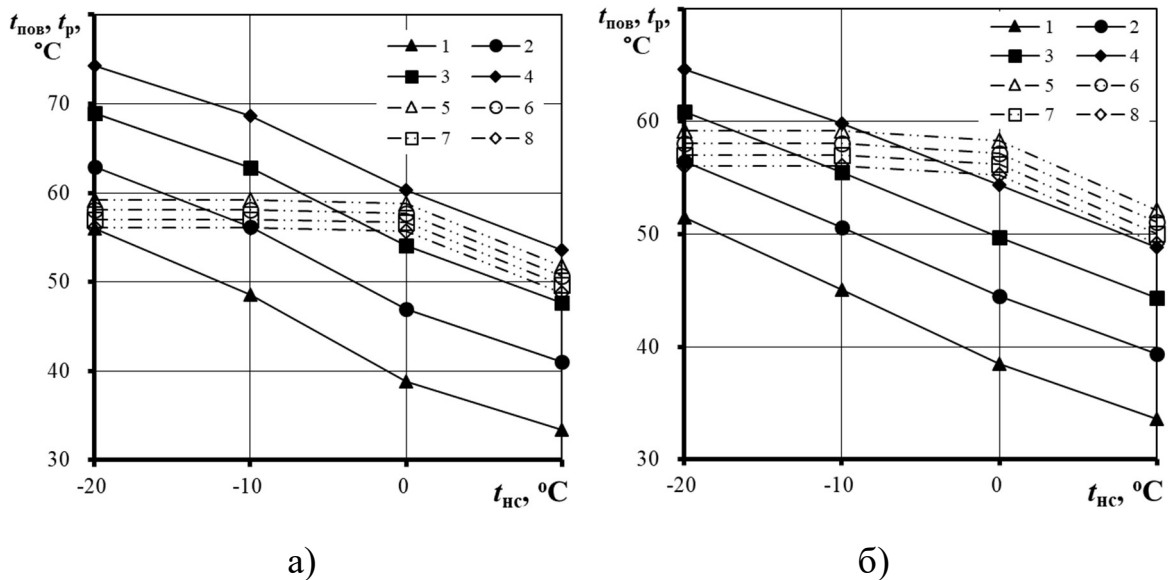


Рис. 3.14. Залежність від температури навколишнього середовища  $t_{нс}$  температури внутрішньої поверхні  $t_{пов}$  в гирлі димової труби (1-4) і точки роси  $t_p$  (5-8) за різних температур  $t_{вх}^r$  та вологовмісту 0,15 кг/кг с.г. димових газів на вході в СТУ та частки підмішуваного повітря  $\sigma$ : а)  $t_{вх}^r = 250 \text{ }^\circ\text{C}$ ;

б)  $t_{вх}^r = 200 \text{ }^\circ\text{C}$ ; 1,5 –  $\sigma = 0\%$ ; 2,6 – 10%; 3,7 – 20%; 4,8 – 30%.

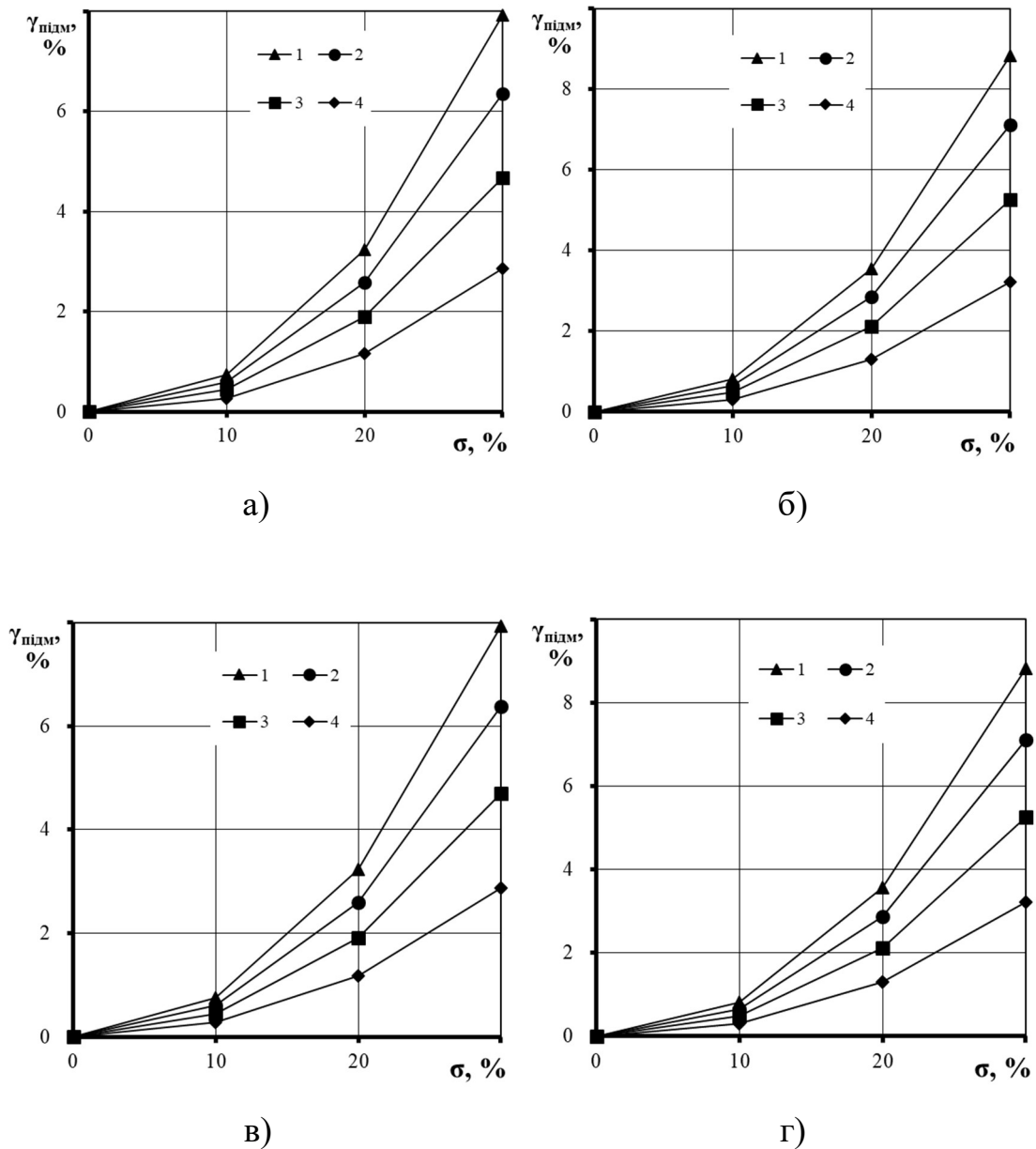


Рис. 3.15. Залежність коефіцієнта відносних витрат теплоти  $\gamma_{\text{підм}}$  на реалізацію повітряного теплового методу від частки підмішуваного повітря  $\sigma$  за різних температур  $t_{\text{вх}}^r$  та вологовмісту  $X_{\text{вх}}^r$  димових газів на вході в СТУ:

а)  $t_{\text{вх}}^r = 250 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $X_{\text{вх}}^r = 0,20$ ;

б)  $t_{\text{вх}}^r = 200 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $X_{\text{вх}}^r = 0,20$ ;

в)  $t_{\text{вх}}^r = 250 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $X_{\text{вх}}^r = 0,15$ ;

г)  $t_{\text{вх}}^r = 200 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $X_{\text{вх}}^r = 0,15$ ;

1 – при  $t_{\text{нс}} = -20 \text{ }^\circ\text{C}$ ; 2 –  $-10 \text{ }^\circ\text{C}$ ; 3 –  $0 \text{ }^\circ\text{C}$ ; 4 –  $10 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Згідно з отриманими результатами, значення  $\sigma$  підмішуваного повітря, необхідне для відвернення конденсаотворення в гирлі розглянутої димової

труби, тим менші, чим вища температура  $t_{\text{вх}}^r$  та нижчий вологовміст  $X_{\text{вх}}^r$  димових газів після сміттєспалювального агрегату, нижча температура навколишнього середовища  $t_{\text{нс}}$  (відповідно більше теплове навантаження агрегату).

Що стосується відносних витрат теплоти  $\gamma_{\text{підм}}$  на реалізацію повітряного методу (рис. 3.15), то за умов дослідження вони є найменшими у порівнянні з двома іншими розглянутими методами тепловологісної обробки димових газів після їх теплоутилізації. Ці значення не перевищують 9 %. Максимальні значення відповідають режимам експлуатації за найменших навантажень сміттєспалювального агрегату (при  $t_{\text{нс}} = +10^\circ\text{C}$ ) і високим температурам димових газів на вході в теплоутилізаційну систему ( $t_{\text{вх}}^r=200^\circ\text{C}$ ).

### **3.5 Порівняльний аналіз застосовуваних методів**

Аналіз виконаних результатів досліджень свідчить, що ефективність застосування теплових методів, пов'язаних з тепловологісною обробкою димових газів перед їхнім надходженням до димової труби, суттєво залежить від багатьох факторів, основними з яких є: режим експлуатації теплогенерувальної установки та використовуваної системи теплоутилізації, а також тип застосовуваної димової труби та її конструкційні особливості.

Виконані дослідження щодо ефективності застосування для сміттєспалювальної установки з водогрійним агрегатом трьох розглянутих у розділі теплових методів запобігання конденсації у самій уразливій до руйнування ділянці газовідвідного тракту— в гирлі димової труби, виявили характерні особливості застосування цих методів.

В табл. 3.1 наведено результати порівняння досліджуваних методів за коефіцієнтом витрат теплоти  $\gamma$  на його реалізацію для сміттєспалювальної установки з опалювальним агрегатом. За результатами досліджень встановлено, що розглянуті методи ранжуються наступним чином. Найкращим є повітряний метод (коефіцієнт  $\gamma$  не перевищує 10% теплової

потужності теплоутилізаційної установки), значно меншою ефективністю характеризується метод підігрівання охолоджених газів у повітрянагрівачі ( $\gamma < 25\%$ ), а використання методу байпасування для розглянутих умов не вбачається доцільним.

Таблиця 3.1 Результати зіставлення розглянутих методів тепловологісної обробки димових газів після теплоутилізації

Застосовувані теплові методи	Максимальне значення коефіцієнта відносних витрат теплоти на реалізацію методу $\gamma$ , %	
	Опалювальні котельні установки	Сміттєспалювальні установки
Пропускання частини відхідних газів котла повз теплоутилізаційне устаткування (байпасування)	більше 50	Без позитивного ефекту
Підігрівання охолоджених в системі теплоутилізації димових газів в теплообміннику-газопідігрівачі	до 19	до 25
Підмішування до охолоджених в системі теплоутилізації димових газів частини повітря, нагрітого у повітрянагрівачі системи (повітряний)	до 36	до 10

В цій же таблиці наведено значення коефіцієнта  $\gamma$  для опалювальних котельних установок, що працюють на традиційному газовому паливі за умов використання розглянутих методів тепловологісної обробки димових газів після теплоутилізації. Дані представлені для металевих димових труб, які за теплоізоляційними властивостями оболонки близькі до залізобетонних. Як видно, ранжування методів для традиційних котелень відрізняється від отриманих в роботі для розглянутої опалювальної установки, що працює на твердих побутових відходах. Особливо відмінності стосується повітряного методу, де для традиційних установок максимальне значення  $\gamma$  може збільшуватись до 36%. Такий результат пояснюється за інших рівних умов різними режимними характеристиками порівнюваних теплогенерувальних установок, зокрема підвищеним вологовмістом димових газів при сталюванні побутового сміття, специфікою теплоутилізаційних систем, більшою висотою труб для сміттєспалювальних установок, зважаючи на наявність в скидних газах підвищеної концентрації домішок, що шкодять довкіллю.

Аналіз отриманих результатів досліджень застосування теплових методів для традиційних газоспоживальних котельних установок показав, що ефективність використання вказаних теплових методів поодиноці, зокрема для опалювальних котельних установок, також має певні обмеження. Так, метод байпасування хоч і є результативним в деяких режимах експлуатації, але зменшує суттєво теплову ефективність теплоутилізації. Метод підсушування є дороговартісним і не забезпечує достатнього захисту димової труби в осінньо-весняний період опалювального періоду через низьку температуру в газопідігрівачі грійного теплоносія (прямої води котла). Повітряний метод є ефективнішим навпаки - у разі значного зниження температури вихідних газів відносно початкової їх точки роси, що спостерігається лише в осінньо-весняний період опалювального сезону завдяки низькій температурі зворотної тепломережної води, яка зумовлює глибоке охолодження димових газів і зниження їхньої точки роси. Підвищення ефективності застосування теплових методів відвернення випадення вологи в газовідвідних трактах та

димовій трубі спонукає до розроблення нових теплоутилізаційних установок з ефективним антикорозійним захистом газовідвідних каналів протягом усього річного періоду експлуатації. Один із шляхів підвищення ефективності такого захисту полягає у розробленні і дослідженні додаткових заходів щодо запобігання конденсатуутворенню в цих каналах та у сумісному використанні методів їх теплового захисту.

## ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3

1. Досліджено ефективність використання для запобігання корозійного зношування димових труб сміттєспалювальних установок теплових методів відвернення випадення конденсату в газовідвідних трактах. Розглянуто три теплові методи тепловологісної обробки димових газів після теплоутилізації (методи байпасування частини відхідних газів котла повз теплоутилізаційну систему, підсушування охолоджених газів у газопідігрівачі та підмішування до цих газів частини повітря, нагрітого у вказаній системі). Показано, що:

- метод байпасування не є результативним для запобігання конденсатоутворенню за розглянутих умов в усіх режимах роботи сміттєспалювальної установки. Використання цього методу потребує великих витрат теплоти на його реалізацію ( $> 50 \%$ ). Однак за усіх досліджуваних режимів в гирлі залізобетонної димової труби температура поверхні  $t_{\text{пов}}$  є нижчою за точку роси  $t_p$ . І значення  $(t_p - t_{\text{пов}})$  є тим більшим, чим нижче значення температури газів після котла  $t_{\text{вх}}^r$ , вище їхній вологовміст  $X_{\text{вх}}$ , нижча температура навколишнього середовища та більша частка байпасування  $\chi$ .

- метод підсушування дає позитивні результати для відвернення конденсатоутворення в димовій трубі лише за великих навантажень сміттєспалювальної установки, що відповідають низьким температурам навколишнього середовища ( $t_{\text{нс}} < -5^\circ\text{C}$ ), високим температурам газів на виході з установки ( $t_{\text{вх}}^r > 200^\circ\text{C}$ ) та за рівнів підігрівання охолоджених газів у газопідігрівачі  $\Delta t$ , що перевищують здебільшого  $30^\circ\text{C}$ . При цьому витрати теплоти на реалізацію методу досягають  $25\%$ :

- повітряний метод за розглянутих часток  $\sigma$  (до  $30 \%$ ) підмішування нагрітого в повітрянагрівачі теплоутилізаційної системи повітря забезпечує відвернення конденсатоутворення в гирлі залізобетонної димової труби лише в режимах роботи сміттєспалювального агрегату, близьких до номінальних, які відповідають низьким температурам навколишнього середовища. І

значення  $\sigma$  тим менші, чим вища температура  $t_{\text{вх}}^r$  та вологовміст  $X_{\text{вх}}^r$  димових газів на вході в теплоутилізаційну систему. За цих умов витрати теплоти на реалізацію методу не перевищують 10 %.

2. Виконано зіставлення ефективності застосування розглянутих методів за коефіцієнтом витрат теплоти  $\gamma$  на його реалізацію для установок з сміттєспалювальним опалювальним агрегатом та опалювальним котлом, що працює на традиційному газовому паливі. Показано, що: ранжування досліджуваних методів є різним для розглянутих котлів у порівнянні з їх використанням для сміттєспалювального агрегату А саме: для сміттєспалювальної установки пріорітетним для використання є повітряний метод, а для традиційних котельних установок найкращими показниками характеризується метод підігрівання охолоджених димових газів у газопідігрівачі.

## **РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВОЛОГІСНИХ РЕЖИМІВ В ДИМОВИХ ТРУБАХ У РАЗІ ЗАСТОСУВАННЯ КОМПЛЕКСУ ТЕПЛОВИХ МЕТОДІВ ДЛЯ АНТИКОРОЗІЙНОГО ЗАХИСТУ ГАЗОВІДВІДНИХ ТРАКТІВ**

Результати виконаних у розділі 3 досліджень щодо ефективності використання поодиночі вказаних теплових методів тепловологісної обробки димових газів після теплоутилізації свідчать, що вони не забезпечують запобігання конденсації в досліджуваних димових трубах в усіх режимах експлуатації сміттєспалювальної установки. Позитивний ефект має місце лише за низьких температур навколишнього середовища, що відповідає великим тепловим навантаженням розглянутого сміттєспалювального агрегату. За результатами досліджень встановлено також, що повітряний метод має певні переваги над двома іншими з точки зору найнижчих значень використання теплоти на реалізацію цього методу.

В даному розділі наведено результати досліджень щодо ефективності застосування для запобігання конденсації в досліджуваних димових трубах повітряного методу сумісно з методом зменшення теплових втрат з поверхні димових труб в навколишнє середовище.

Метод зменшення теплових втрат також належить до теплових методів, що сприяють відверненню конденсації в газовідвідних трактах. Цей метод може реалізуватись, наприклад, шляхом теплоізоляції оболонки труб або розміщенню в ній вставного газовідвідного ствола.

### **4.1 Аналіз впливу на тепловологісний стан в димових трубах теплового методу зменшення втрат теплоти в навколишнє середовище шляхом теплоізоляції димової труби або розміщення в ній вставного газовідвідного ствола**

Перейдемо до розгляду у разі застосування пропонованої системи теплоутилізації ефективності використання для запобігання конденсації в димовій трубі методу зменшення втрат теплоти з

зовнішньої поверхні її корпусу. На рис. 2.3 зображені фрагменти досліджуваних труб з зовнішньою теплоізоляцією труби та розміщенням в ній вставного газовідвідного ствола.

Розглядалися також труби висотою 120 м, зовнішнім діаметром 2,12 м та товщиною залізобетонної оболонки 0,16 м. Для теплоізоляції використовувався матеріал з різними коефіцієнтами теплопровідності  $\lambda$  (0,04 – 0,06 Вт/(м·К) та товщиною  $\delta_{із}$  (0,05 – 0,25 м). Значення обраних характеристик відповідає практичному діапазону зазвичай застосовуваних матеріалів для даного призначення.

Визначалися тепловологісні показники (температура поверхні  $t_{пов}$ , точка роси  $t_p$  та їх різниця  $\Delta t = t_{пов} - t_p$ ) в гирлі труби за наявності теплового методу зменшення втрат та без нього за умов розглянутих в роботі комбінованих систем теплоутилізації скидних димових газів.

За результатами виконаних в розд. 3.1. досліджень тепловологісних показників  $t_{пов}$  та  $t_p$  (рис. 3.1) за умов встановлення в хвостовій частині сміттєспалювального агрегату пропонованої комбінованої системи теплоутилізації без застосування заходів щодо захисту димової труби встановлено, що в усіх режимах котла не дотримується умова  $t_{пов} > t_p$ , що призводить до конденсатуутворення в цій трубі, яке викликає її корозійне зношування. Це викликано значним зниженням температури димових газів в застосовуваній системі теплоутилізації.

Розглянемо досліджувані тепловологісні показники у разі застосування пропонованої системи теплоутилізації при використанні теплоізоляції корпусу димової труби матеріалом з різними властивостями.

На рис. 4.1 – 4.4 наведено показники тепловологісного стану (точки роси  $t_p$  та температура поверхні  $t_{пов}$ ) в гирлі розглянутих димових труб за різних режимів експлуатації сміттєспалювальної установки протягом опалювального періоду за умов використання пропонованої комбінованої системи теплоутилізації (СТУ) та зовнішньої теплоізоляції труби.

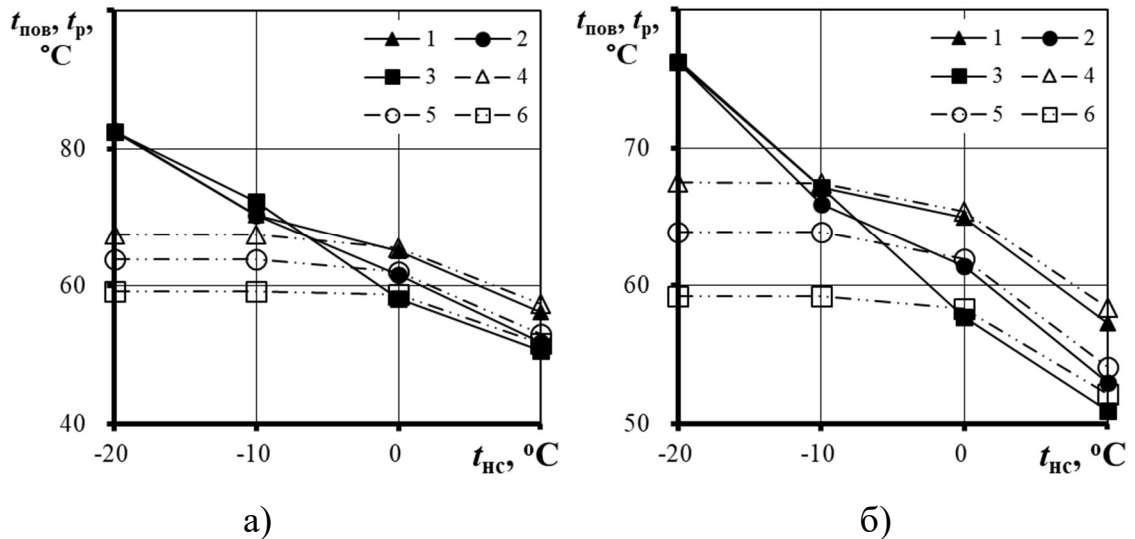


Рис. 4.1. Залежність від температури навколишнього середовища  $t_{нс}$  температури внутрішньої поверхні  $t_{пов}$  в гирлі димової труби (1-3) і точки роси  $t_p$  (4-6) за різних температур  $t_{вх}^r$  і вологовмісту  $X_{вх}$  димових газів на вході в СТУ у разі застосування систем теплоутилізації при теплоізоляції труби матеріалом з коефіцієнтом  $\lambda = 0,04 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$  та товщиною  $\delta_{із} = 0,25 \text{ м}$ :

а)  $t_{вх}^r = 250 \text{ }^\circ\text{C}$ ; б)  $t_{вх}^r = 200 \text{ }^\circ\text{C}$ ;

1, 4 –  $X_{вх} = 0,25 \text{ кг}/\text{кг с.г.}$ ; 2, 5 –  $X_{вх} = 0,20$ ; 3, 6 –  $X_{вх} = 0,15$ .

Як видно з наведених результатів (рис. 4.1), за умов теплоізолювання димової труби матеріалом з найменшим з досліджуваних коефіцієнтом теплопровідності  $\lambda = 0,04 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$  та з найбільшою товщиною  $\delta_{із} = 0,25 \text{ м}$  тепловологісний режим в гирлі димової труби за відсутності конденсатоутворення реалізується лише за температур атмосферного повітря від  $0^\circ\text{C}$  і нижче в залежності від температур та вологовмісту димових газів на вході в теплоутилізаційну систему.

За умов підвищення коефіцієнта  $\lambda$  до значень  $0,06 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$  за тієї ж товщини ізоляції  $\delta_{із} = 0,25 \text{ м}$  (рис. 4.2) температури навколишнього середовища, за яких настає перевищення температури поверхні  $t_{пов}$  над точкою роси  $t_p$  змінюються не суттєво. Вплив коефіцієнта  $\lambda$  на тепловологісний режим в димовій трубі проілюстровано також табл. 4.1 та рис. 4.3.

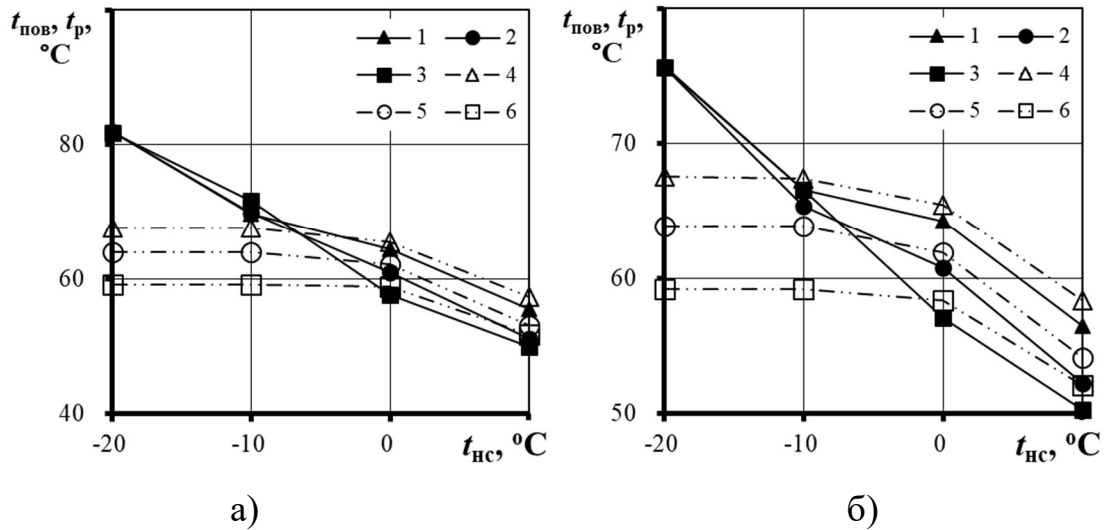


Рис. 4.2. Залежність від температури навколишнього середовища  $t_{нс}$  температури внутрішньої поверхні  $t_{пов}$  (1-3) і точки роси  $t_p$  (4-6) за різних температур  $t_{вх}^f$  і вологовмісту  $X_{вх}$  газів вході в СТУ для теплоізоляційного матеріалу з коефіцієнтом  $\lambda = 0,06$  Вт/(м·К) та товщиною  $\delta_{із} = 0,25$  м:

а)  $t_{вх}^f = 250$  °С; б)  $t_{вх}^f = 200$  °С;

1, 4 –  $X_{вх} = 0,25$  кг/кг с.г.; 2, 5 –  $X_{вх} = 0,20$ ; 3, 6 –  $X_{вх} = 0,15$ .

Таблиця 4.1 Тепловологісні показники ( $t_{пов}$  і  $t_p$ ) за різних значень вологовмісту  $X_{вх}$  і температури  $t_{вх}^f = 250$  °С димових газів на вході в СТУ та за різних значень  $t_{нс}$  для ізоляційного матеріалу з різним коефіцієнтом  $\lambda$  та

товщиною  $\delta_{із} = 0,2$  м

Коефіцієнт теплопровідності теплоізоляції $\lambda$ , Вт/(м·К)	Температури $t_{пов}$ та $t_p$ за різних значень $t_{нс}$ , °С							
	-20		-10		0		10	
	$t_p$	$t_{пов}$	$t_p$	$t_{пов}$	$t_p$	$t_{пов}$	$t_p$	$t_{пов}$
$X_{вх} = 0,25$ кг/кг с.г.;								
0,04	67,5	82,2	67,5	70,1	65,5	64,8	57,4	55,9
0,05		81,9		69,7		64,4		55,5
0,06		81,5		69,3		64,0		55,0
$X_{вх} = 0,20$ кг/кг с.г.								
0,04	63,9	82,3	63,9	70,2	62,1	61,3	53,1	51,6
0,05		82,0		69,8		61,0		51,2
0,06		81,6		69,4		60,6		50,7

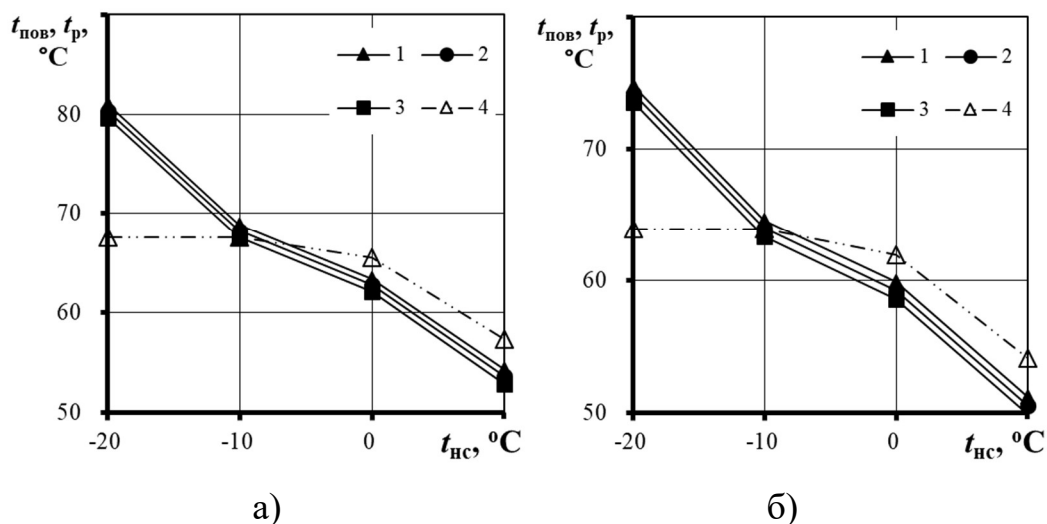


Рис. 4.3. Залежність від температури навколишнього середовища  $t_{nc}$  температури внутрішньої поверхні  $t_{пов}$  (1-3) і точки роси  $t_p$  (4) за різних температури  $t_{вх}^r$  і вологовмісту  $X_{вх}$  димових газів на вході в СТУ для теплоізоляційного матеріалу з різним коефіцієнтом  $\lambda$  та товщиною  $\delta_{із} = 0,1$  м:  
 а)  $t_{вх}^r = 250$  °C;  $X_{вх} = 0,25$  кг/кг с.г.; б)  $t_{вх}^r = 200$  °C;  $X_{вх} = 0,20$  кг/кг с.г.;  
 1 –  $\lambda = 0,04$  Вт/(м·К); 2 –  $\lambda = 0,05$ ; 3 –  $\lambda = 0,06$ .

За результатами досліджень в розглянутому практичному діапазоні зміни  $\lambda$  досліджувані тепловологісні показники ( $t_{пов}$  і  $t_p$ ) змінюються мало.

На рис. 4.4 наведено результати досліджень щодо закономірності зміни показників  $t_{пов}$  і  $t_p$  в гирлі димової труби за різних значень товщини матеріалу теплоізоляції  $\delta_{із}$  при фіксованому значенні  $\lambda = 0,05$  Вт/(м·К). Отримані результати свідчать, що зміна  $\delta$  має також не суттєвий вплив на тепловологісний режим, як і коефіцієнт теплопровідності матеріалу  $\lambda$ . Проте криві температури поверхні  $t_{пов}$  дещо більше розшаровані. Але все ж перехід до умови перевищення температури поверхні  $t_{пов}$  над точкою роси  $t_p$  спостерігається в тому ж температурному діапазоні атмосферного повітря  $t_{nc}$  (від  $-10$ °C до  $0$ °C). Тобто режимні характеристики розглянутого сміттєспалювального агрегату, призначеного для нагрівання дуттьового повітря і води системи опалення мають вирішальний вплив на досліджувані тепловологісні показники.

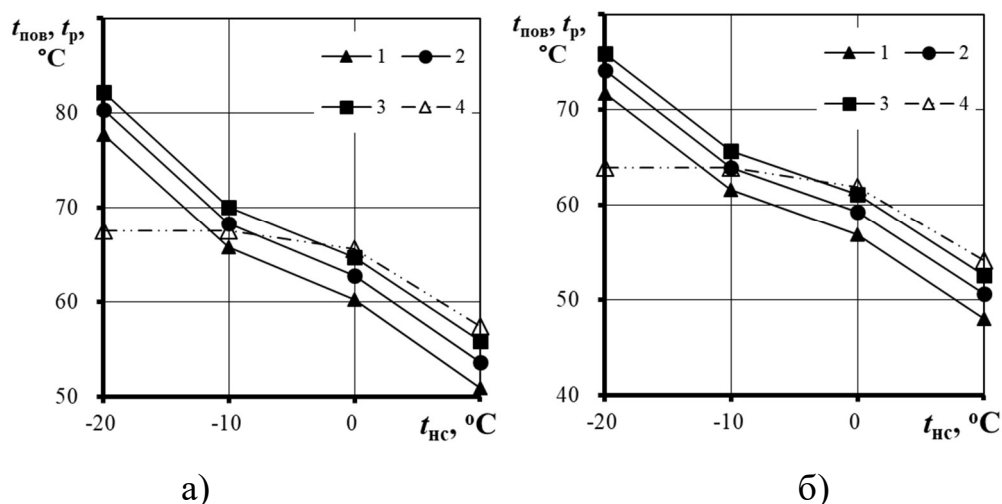


Рис. 4.4. Залежність від температури навколишнього середовища  $t_{нс}$  температури внутрішньої поверхні  $t_{пов}$  (1-3) і точки роси  $t_p$  (4) за різних температур  $t_{вх}^r$  і вологовмісту  $X_{вх}$  димових газів на вході СТУ для теплоізоляційного матеріалу з коефіцієнтом  $\lambda = 0,05$  Вт/(м·К) при різних значеннях його товщини  $\delta_{із}$ :

а)  $t_{вх}^r = 250$  °С;  $X_{вх} = 0,25$  кг/кг с.г.; б)  $t_{вх}^r = 200$  °С;  $X_{вх} = 0,20$  кг/кг с.г.;  
 1 –  $\delta_{із} = 0,05$  м; 2 –  $\delta_{із} = 0,1$  м; 3 –  $\delta_{із} = 0,25$ .

Це зумовлено режимами охолодження димових газів у димовій трубі. На рис. 4.5 наведено закономірності зміни коефіцієнта охолодження  $K_{ох}$  труби та температури внутрішньої поверхні її гирла в залежності від товщини теплоізоляції  $\delta$  за різних значень коефіцієнта теплопровідності  $\lambda$ .

Як видно з наведених результатів, за певної товщини теплоізоляції  $\delta_{із}$  ( $\delta_{із} > 0,05$  м) значення  $K_{ох}$  та  $t_{пов}$  стабілізуються. Отже, рекомендоване мінімальне значення  $\delta_{із}$  повинно визначатись за конструкційними особливостями ізоляційного матеріалу, його вартістю та технологією нанесення на поверхню корпусу димової труби.

За результатами виконаних, досліджень можна зробити висновок, що застосування теплоізоляції в певних межах  $\lambda$  та  $\delta_{із}$  поліпшує тепловологісний режим її експлуатації, але не забезпечує відвернення випадення конденсату в гирлі досліджуваних труб в усіх режимах їх експлуатації. Так запобігання конденсатуутворенню реалізується лише за від'ємних температур

атмосферного повітря для усіх розглянутих температур та вологовмістів димових газів на вході в систему теплоутилізації.

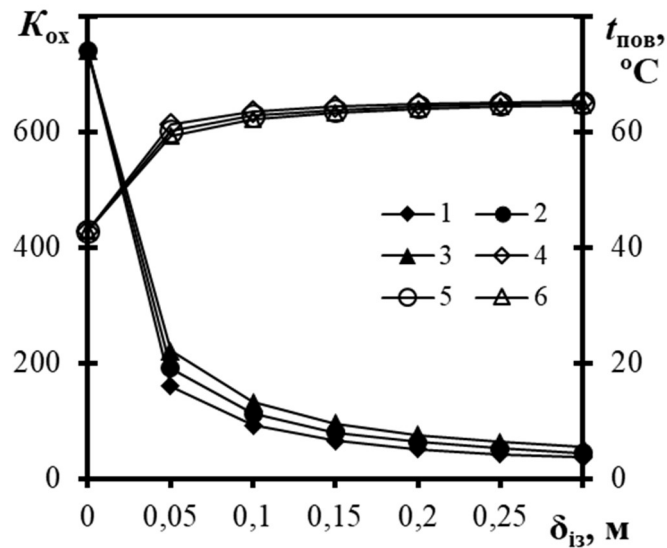


Рис. 4.5. Залежність від товщини  $\delta_{iz}$  теплоізоляції димової труби коефіцієнта  $K_{ox}$  охолодження труби (1-3) та температури внутрішньої поверхні  $t_{пов}$  (4-6) за температури  $t_{вх}^r = 250 \text{ }^\circ\text{C}$  і вологовмісту  $X_{вх} = 0,25 \text{ кг/кг}$  с.г. димових газів на вході в СТУ для теплоізоляції труби з різним коефіцієнтом  $\lambda$  при  $t_{нс} = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ :

1, 4 –  $\lambda = 0,04 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ; 2,5 –  $\lambda = 0,05$ ; 3,6 –  $\lambda = 0,06$ .

Перейдемо до розгляду впливу на досліджувані тепловологісні показники  $t_{пов}$  і  $t_p$  заходу, що полягає в розміщенні в залізобетонній оболонці вставного ствола для евакуації димових газів. На рис. 4.6 - 4.8 та табл. 4.2. наведено відповідні результати для різних значень товщини повітряного прошарку між оболонкою димової труби та вставним стволом.

Розміщення газовідвідного ствола окрім створення ізоляційного повітряного прошарку дозволяє збільшувати швидкість скидних газів в димовій трубі, яка зазвичай знижується в результаті застосування теплоутилізаційних технологій. Збільшення швидкості сприяє підвищенню температури поверхні  $t_{пов}$  та покращенню умов розсіювання шкідливих викидів в навколишньому середовищі.

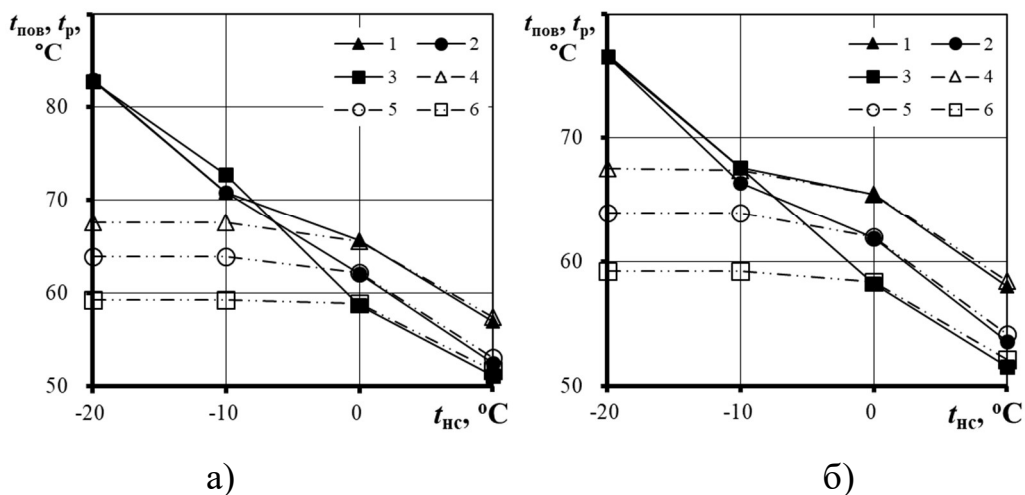


Рис. 4.6. Залежність від температури навколишнього середовища  $t_{\text{нс}}$  температури внутрішньої поверхні  $t_{\text{пов}}$  в гирлі димової труби (1-3) і точки роси  $t_p$  (4-6) за різних температур  $t^r_{\text{вх}}$  і вологовмісту  $X_{\text{вх}}$  димових газів на вході в СТУ у разі монтування вставного ствола при значенні товщини повітряного прошарку  $\delta_{\text{пш}} = 0,1$  м:

а)  $t^r_{\text{вх}} = 250$  °C; б)  $t^r_{\text{вх}} = 200$  °C;

1, 4 –  $X_{\text{вх}} = 0,25$  кг/кг с.г.; 2, 5 –  $X_{\text{вх}} = 0,20$ ; 3, 6 –  $X_{\text{вх}} = 0,15$ .

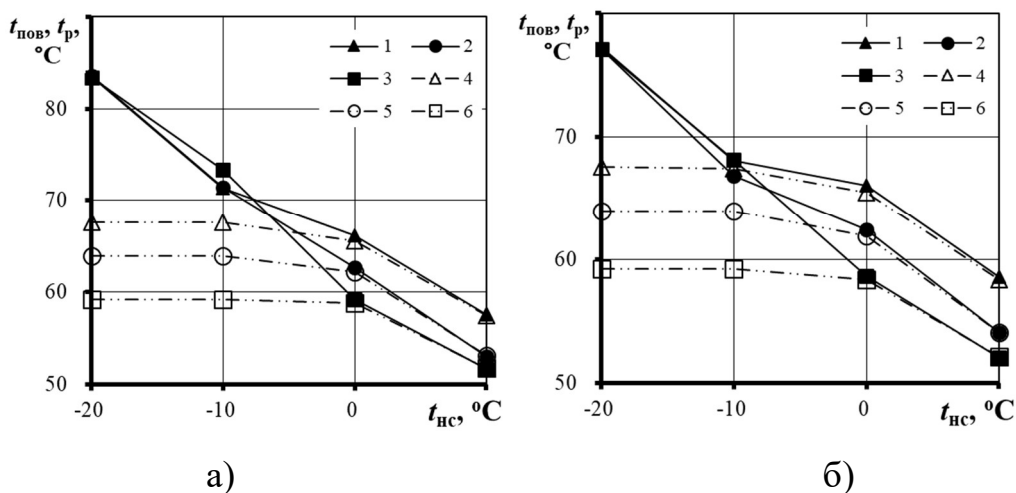


Рис. 4.7. Залежність від температури навколишнього середовища  $t_{\text{нс}}$  температури внутрішньої поверхні  $t_{\text{пов}}$  в гирлі димової труби (1-3) і точки роси  $t_p$  (4-6) за різних температур  $t^r_{\text{вх}}$  і вологовмісту  $X_{\text{вх}}$  димових газів на вході в СТУ у разі монтування вставного ствола при значенні товщини повітряного прошарку  $\delta_{\text{пш}} = 0,3$  м:

а)  $t^r_{\text{вх}} = 250$  °C; б)  $t^r_{\text{вх}} = 200$  °C;

1, 4 –  $X_{\text{вх}} = 0,25$  кг/кг с.г.; 2, 5 –  $X_{\text{вх}} = 0,20$ ; 3, 6 –  $X_{\text{вх}} = 0,15$ .

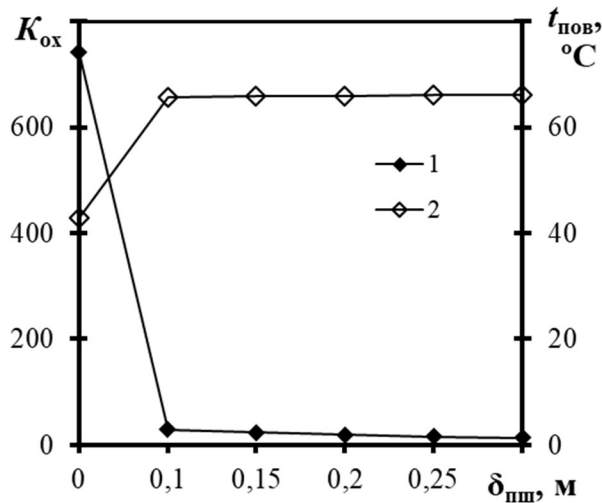


Рис. 4.8. Залежність від товщини  $\delta_{\text{пш}}$  повітряного прошарку у разі монтування вставного ствола коефіцієнта  $K_{\text{ох}}$  охолодження труби (1) та температури внутрішньої поверхні  $t_{\text{пов}}$  (2) за температури  $t_{\text{вх}}^f = 250 \text{ }^\circ\text{C}$  і вологовмісту  $X_{\text{вх}} = 0,25 \text{ кг/кг с.г.}$  димових газів на вході в СТУ при  $t_{\text{нс}} = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Таблиця 4.2 Тепловологісні показники ( $t_{\text{пов}}$  і  $t_{\text{р}}$ ) за різних значень вологовмісту  $X_{\text{вх}}$  і температури  $t_{\text{вх}}^f = 250 \text{ }^\circ\text{C}$  димових газів на вході в СТУ від різних значень  $t_{\text{нс}}$  та значень товщини повітряного прошарку між оболонкою димової труби та газовідвідним стволом

Товщина Повітряного прошарку $\delta_{\text{пш}}, \text{ м}$	Залежність від $t_{\text{нс}}, \text{ }^\circ\text{C}$ температури $t_{\text{пов}}$ та $t_{\text{р}}$							
	-20		-10		0		10	
	$t_{\text{р}}$	$t_{\text{пов}}$	$t_{\text{р}}$	$t_{\text{пов}}$	$t_{\text{р}}$	$t_{\text{пов}}$	$t_{\text{р}}$	$t_{\text{пов}}$
$X_{\text{вх}} = 0,25 \text{ кг/кг с.г.};$								
0,1	67,5	82,9	67,5	70,8	65,5	65,6	57,4	56,9
0,2		83,3		71,1		65,9		57,3
0,3		83,5		71,3		66,1		57,5
$X_{\text{вх}} = 0,20 \text{ кг/кг с.г.}$								
0,1	63,9	83,0	63,9	70,9	62,1	62,1	53,1	52,5
0,2		83,1		71,2		62,4		52,8
0,3		83,6		71,4		62,6		53,0

Отримані результати свідчать про аналогічні висновки щодо тепловологісного стану в гирлі досліджуваної димової труби зі вставним стволом, як і за наявності теплоізоляції. А саме: застосування ствола в певних межах  $\delta_{\text{пш}}$  покращує тепловологісні показники ( $t_{\text{пов}}$  і  $t_{\text{р}}$ ), але не забезпечує відвернення випадення конденсату в гирлі досліджуваних труб в усіх

режимах їх експлуатації. Так запобігання конденсатуутворенню реалізується лише за від'ємних температур атмосферного повітря для усіх розглянутих температур та вологовмісту відхідних газів після сміттєспалювального агрегату, а також товщин повітряного прошарку.

Величина повітряного прошарку визначається технічними можливостями монтування ствола та вимогами щодо швидкості в трубі для забезпечення необхідного гідравлічного режиму та покращення умов розсіювання шкідливих викидів димових газів.

Отже, за результатами досліджень використання одного теплового методу зменшення теплових втрат з поверхні труби в навколишнє середовище теж не забезпечує відвернення випадення конденсату в усіх режимах експлуатації досліджуваної сміттєспалювальної установки.

#### **4.2 Встановлення закономірностей зміни тепловологісних характеристик в гирлі теплоізолюваної димової труби при використанні повітряного методу**

Для підвищення ефективності захисту димових труб від корозійного зношування в результаті конденсатуутворення запропоновано використання комплексу розглянутих теплових методів, а саме повітряного та зменшення теплових втрат в навколишнє середовище. На рис. 4.9 наведено відповідну схему з комплексом зазначених методів: за наявності теплоізоляції димової труби або вставного газовідвідного ствола.

Використання пропонованого комплексу методів вбачається найефективнішим з точки зору невеликих капітальних витрат на його реалізацію та витрат теплоти на використання повітряного методу, що входить до цього комплексу.

Графіки рис. 4.10 - 4.11 ілюструють характерні результати розрахункових досліджень щодо тепловологісних показників  $t_{\text{пов}}$  і  $t_p$  в гирлі теплоізолюваної залізобетонної труби (з коефіцієнтом теплопровідності матеріалу ізоляції  $\lambda = 0,04$  Вт/(м·К) та товщиною  $\delta = 0,05$  м) за різних

параметрів димових газів на вході в пропонувану комбіновану систему теплоутилізації у разі використанні повітряного методу з часткою  $\sigma$  підмішування повітря, нагрітого у повітряонагрівачі цієї системи.

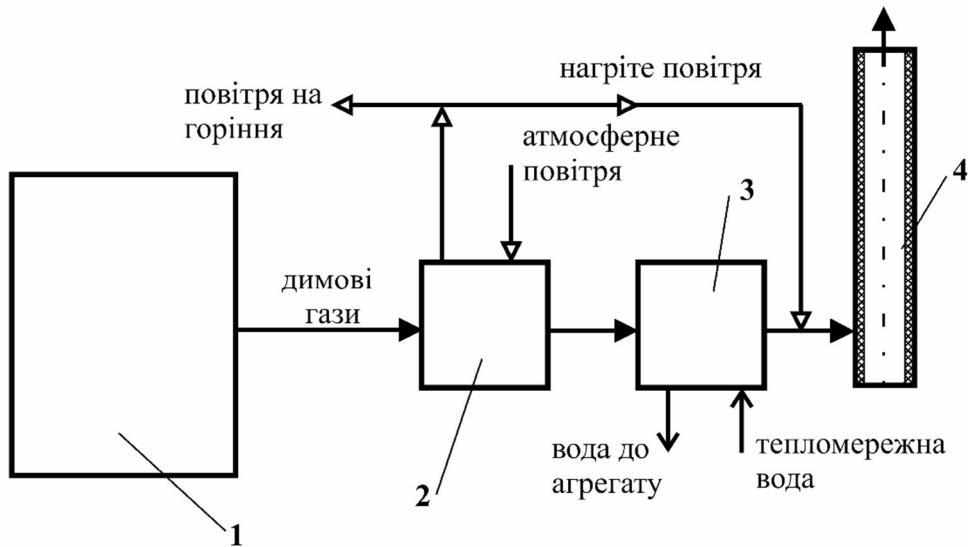


Рис. 4.9. Схема сміттєспалювальної установки з комбінованою системою теплоутилізації та повітряного методу запобігання конденсації утворюванню в димовій трубі з теплоізоляцією або вставним стволем:

1 – сміттєспалювальний водогрійний агрегат; 2 – повітряонагрівач; 3 – водопідігрівач; 4 – димова труба з теплоізоляцією або вставним стволем.

Як видно з наведених результатів, при частках  $\sigma < 5\%$  запобігання конденсації утворюванню має місце за низьких температур навколишнього середовища. За умов  $\sigma \geq 5\%$  для усього періоду експлуатації теплоутилізаційної установки тепловологісні показники  $t_{\text{пов}}$  і  $t_p$  відповідають режиму запобігання конденсації утворюванню в трубі, з перевищенням температури  $t_{\text{пов}}$  у її гирлі над точкою роси  $t_p$  димових газів.

На величину ефективної частки  $\sigma_{\text{еф}}$  (за якої починає дотримуватись умова  $t_{\text{пов}} > t_p$ ) суттєвий вплив має температура  $t_{\text{вх}}^r$  і вологовміст  $X_{\text{вх}}$  димових газів на вході в систему теплоутилізації (СТУ). Зі збільшенням температури  $t_{\text{вх}}^r$  та вологовмісту  $X_{\text{вх}}$  зменшується значення  $\sigma_{\text{еф}}$ .

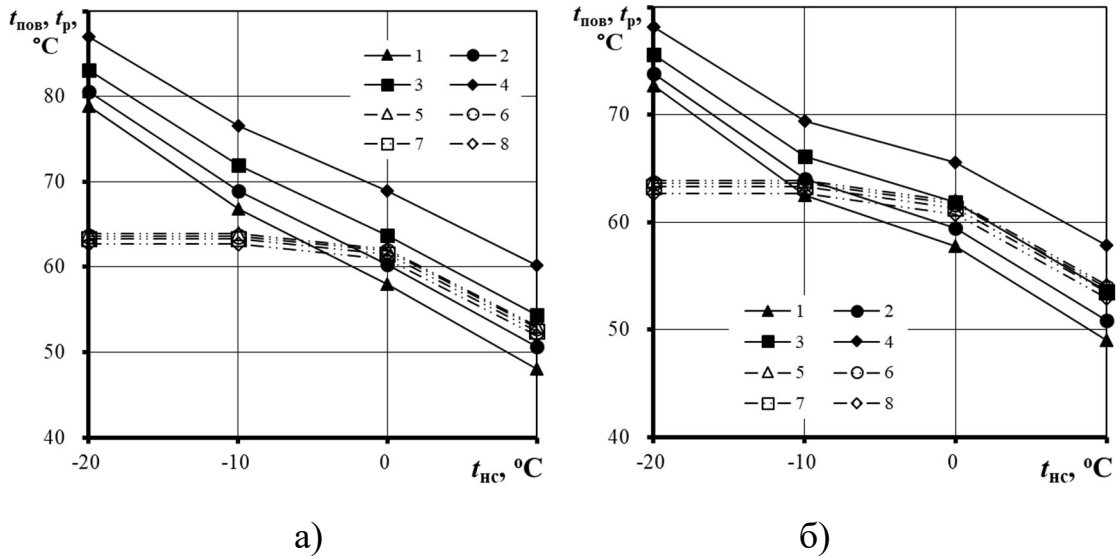


Рис. 4.10. Залежність від температури навколишнього середовища  $t_{\text{нс}}$  температури внутрішньої поверхні  $t_{\text{пов}}$  в гирлі теплоізолюваної димової труби (1-4) і точки роси  $t_p$  (5-8) за різних температур  $t_{\text{вх}}^r$  та вологовмісті 0,20 кг/кг с.г. димових газів на вході в СТУ та часток підмішуваного повітря  $\sigma$  при а)  $t_{\text{вх}}^r = 250$  °C; б)  $t_{\text{вх}}^r = 200$  °C; 1, 5 –  $\sigma = 0\%$ ; 2, 6 –  $2\%$ ; 3, 7 –  $5\%$ ; 4, 8 –  $10\%$ .

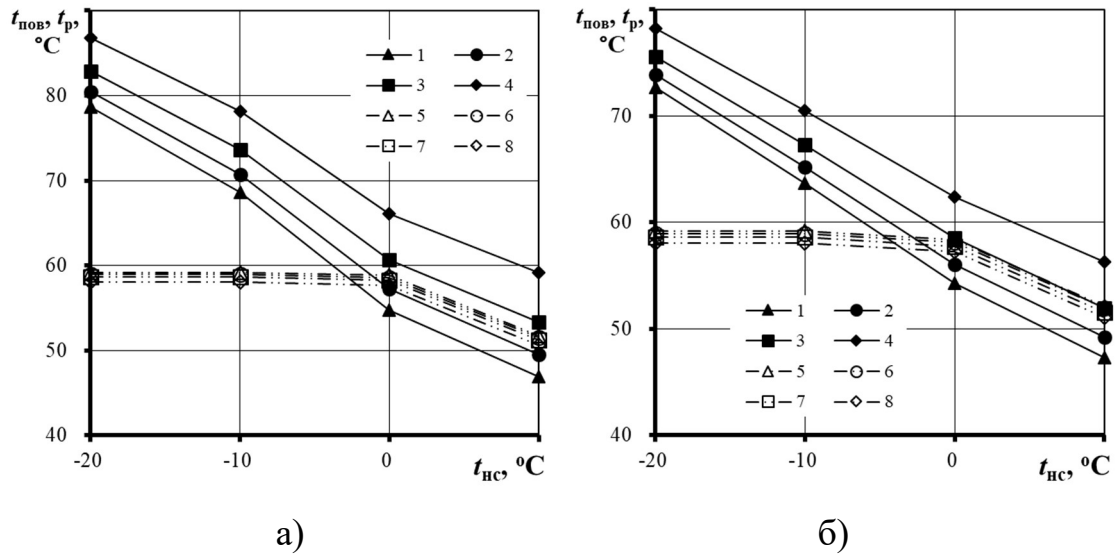


Рис. 4.11. Залежність від температури навколишнього середовища  $t_{\text{нс}}$  температури внутрішньої поверхні  $t_{\text{пов}}$  в гирлі теплоізолюваної димової труби (1-4) і точки роси  $t_p$  (5-8) за різних температур  $t_{\text{вх}}^r$  та вологовмісті 0,15 кг/кг с.г. димових газів на вході в СТУ та часток підмішуваного повітря  $\sigma$ : а)  $t_{\text{вх}}^r = 250$  °C; б)  $t_{\text{вх}}^r = 200$  °C; 1, 5 –  $\sigma = 0\%$ ; 2, 6 –  $2\%$ ; 3, 7 –  $5\%$ ; 4, 8 –  $10\%$ .

Рис. 4.12, 4.13 ілюструють тепловологісний режим в гирлі труби на основі аналізу закономірностей зміни значень  $\Delta t = t_{\text{пов}} - t_p$  в різних режимах експлуатації сміттєспалювальної установки.

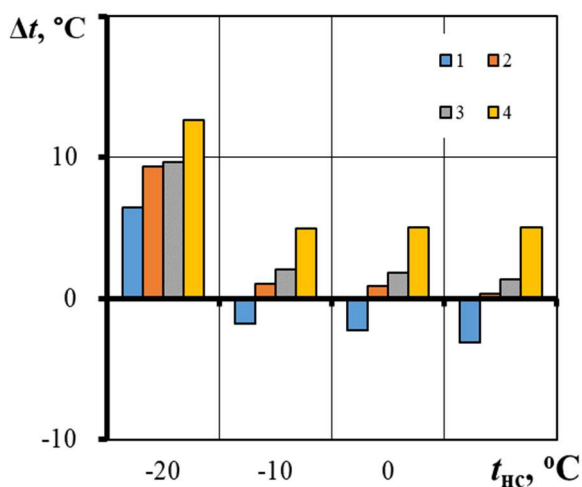


Рис. 4.12. Залежність від температури навколишнього середовища  $t_{\text{НС}}$  різниці температур  $\Delta t = t_{\text{пов}} - t_p$  за температури  $t_{\text{вх}}^r = 200^\circ\text{C}$  та вологовмісту  $X_{\text{вх}} = 0,25$  кг/кг.с.г. димових газів на вході в СТУ при теплоізоляції труби матеріалом з коефіцієнтом  $\lambda = 0,06$  при різних значеннях його товщини  $\delta$  та часток підмішуваного повітря  $\sigma$ : 1, 2 –  $\delta = 0,05$  м; 3, 4 –  $\delta = 0,1$  м.

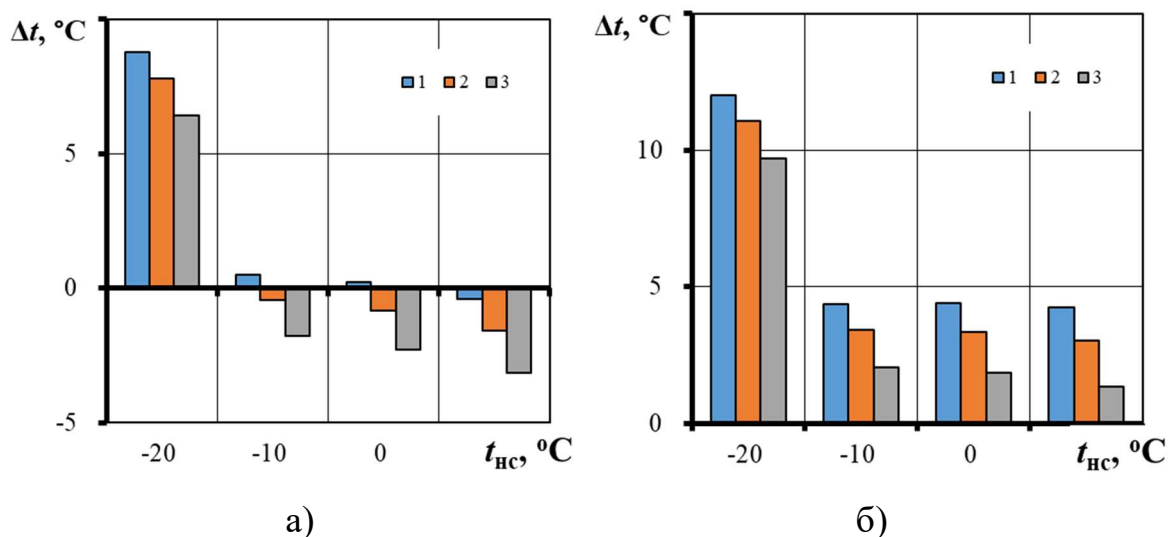


Рис. 4.13. Залежність від температури навколишнього середовища  $t_{\text{НС}}$  різниці температур  $\Delta t = t_{\text{пов}} - t_p$  за температури  $t_{\text{вх}}^r = 200^\circ\text{C}$  та вологовмісту  $X_{\text{вх}} = 0,25$  кг/кг.с.г. димових газів на вході в СТУ при наявності теплоізоляції товщиною  $\delta = 0,05$  м за різних значень коефіцієнта теплопровідності  $\lambda$  та часток підмішуваного повітря  $\sigma=5\%$  (а) і  $\sigma=10\%$  (б):

1 –  $\lambda=0,04$ ; 2 –  $\lambda=0,05$ ; 3 –  $\lambda=0,06$ .

Отримані результати виконаних досліджень свідчать, що комплекс методів забезпечує тепловологісний режим в розглянутій димовій трубі із відверненням конденсатоутворення в усіх режимах експлуатації сміттєспалювальної установки. При цьому частки підмішуваного повітря для дотримання в гирлі труби умови  $t_{\text{пов}} > t_p$  змінюються від 5% до 10%. І ці частки тим менші, чим вища температура і нижчий вологовміст димових газів на вході в теплоутилізаційну систему.

Слід наголосити, що додавання повітря для відвернення конденсатоутворення в димовій трубі повинно реалізуватися лише за відносно високих температур атмосферного повітря, тобто в осінньо-весняний період. В самий холодний період опалювального сезону у витрат теплоти здійснення комплексу теплових методів немає потреби.

На рис. 4.14 наведено залежності коефіцієнта відносних витрат теплоти  $\gamma_{\text{підм}}$  на реалізацію повітряного теплового методу від частки підмішуваного повітря  $\sigma$  за різних режимів сміттєспалювального агрегату.

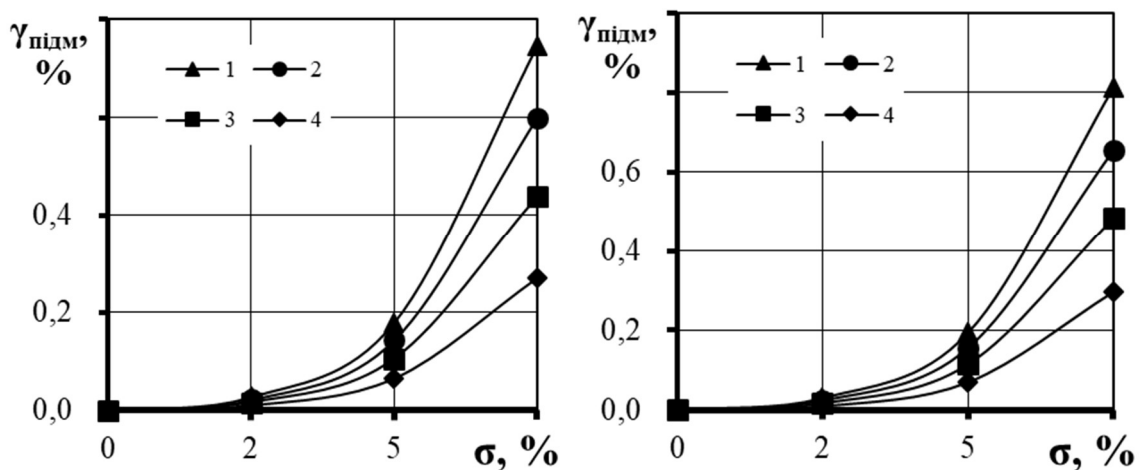


Рис. 4.14. Залежність коефіцієнта відносних витрат теплоти  $\gamma_{\text{підм}}$  на реалізацію повітряного теплового методу від частки підмішуваного повітря  $\sigma$  за різних температур  $t_{\text{вх}}^r$  та вологовмісту  $X_{\text{вх}}^r$  димових газів на вході в СТУ:

а)  $t_{\text{вх}}^r = 250 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $X_{\text{вх}}^r = 0,20$ ; б)  $t_{\text{вх}}^r = 200 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $X_{\text{вх}}^r = 0,20$ ;

1 – при  $t_{\text{нс}} = -20 \text{ }^\circ\text{C}$ ; 2 –  $-10 \text{ }^\circ\text{C}$ ; 3 –  $0 \text{ }^\circ\text{C}$ ; 4 –  $10 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Як вже зазначалося, витрати теплоти на реалізацію комплексу методів (повітряного та теплоізоляції) визначаються лише витратами на реалізацію повітряного методу. При частці підмішуваного повітря  $\sigma_{\text{эф}} = 5\%$  коефіцієнт витрат теплоти  $\gamma_{\text{підм}}$  на реалізацію повітряного методу, а відтак комплексу методів не перевищує 1%. Частки підмішуваного повітря і коефіцієнти витрат можуть бути більшими, зважаючи на необхідність виконання умов перевищення на 2 - 3 °С температури внутрішньої поверхні над точкою роси, а також у разі необхідності покращення умов довкілля шляхом забезпечення більш ефективного розсіювання шкідливих викидів, які містяться у продуктах згоряння установок спалювання побутового сміття.

#### **4.3 Визначення показників ефективності повітряного методу для труб зі вставним газовідвідним стволом для відвернення в них випадення конденсату**

Перейдемо до висвітлення результатів досліджень щодо ефективності застосування повітряного методу для залізобетонної димової труби зі вставним стволом. На рис. 4.15, 4.16 наведено тепловологісні показники в гирлі такої труби для сміттеспалювальної установки з водогрійним агрегатом та комбінованою системою теплоутилізації димових газів (рис. 4.9).

Отримані результати свідчать, що використання повітряного методу в комплексі з розміщенням в залізобетонній трубі вставного газовідвідного ствола з утворенням повітряного прошарку між основною трубою і вставним газовідвідним стволом також забезпечує запобігання конденсатуутворенню в гирлі цієї труби у всіх режимах роботи котла. При цьому максимальна частка підмішуваного повітря  $\sigma_{\text{эф}}$  має перевищувати 2%.

Зважаючи на необхідність дотримання в гирлі труби величини  $\Delta t = t_{\text{пов}} - t_{\text{р}} > 2-3^{\circ}\text{C}$  та для забезпечення необхідного гідравлічного режиму, а також для покращення умов розсіювання шкідливих викидів димових газів реальні частки  $\sigma$  зазвичай вищі за  $\sigma_{\text{эф}}$ .

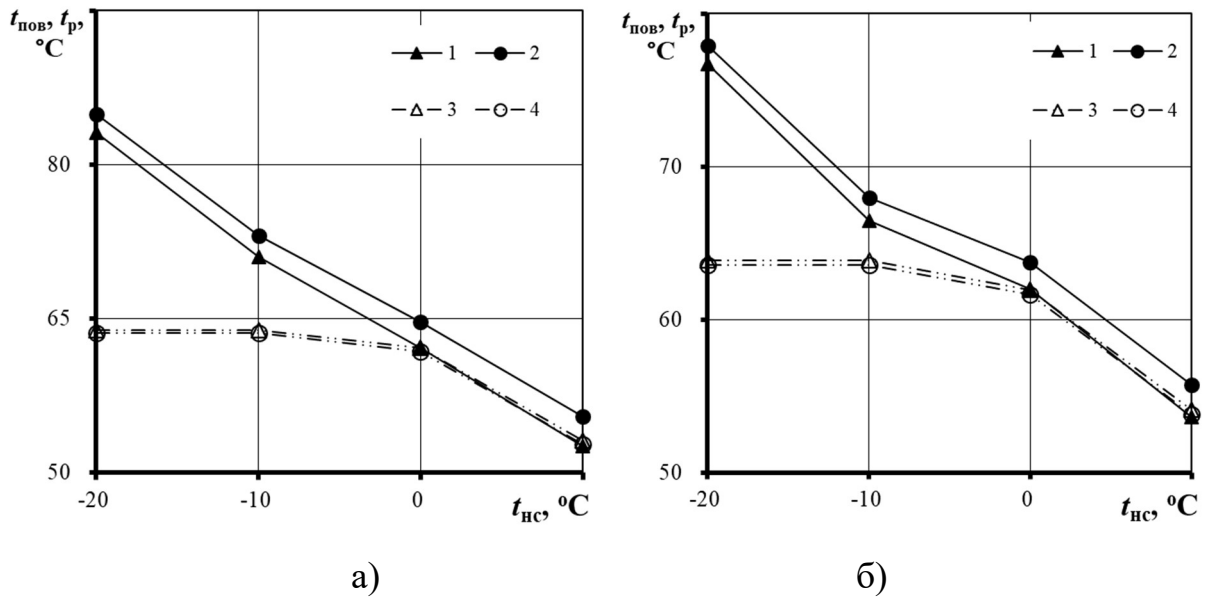


Рис. 4.15. Залежність від температури навколишнього середовища  $t_{\text{нс}}$  температури поверхні  $t_{\text{пов}}$  в гирлі димової труби зі вставним стволом з товщиною шару повітря  $\delta = 0,1$  м (1, 2) і точки роси  $t_{\text{р}}$  (3, 4) за різних температур  $t^f_{\text{вх}}$  та вологовмісті  $0,20$  кг/кг с.г. димових газів на вході в СТУ та часток підмішуваного повітря  $\sigma$ :

а)  $t^f_{\text{вх}} = 250$   $^{\circ}\text{C}$ ; б)  $t^f_{\text{вх}} = 200$   $^{\circ}\text{C}$ ; 1, 3 –  $\sigma = 0\%$ ; 2, 4 –  $2\%$ .

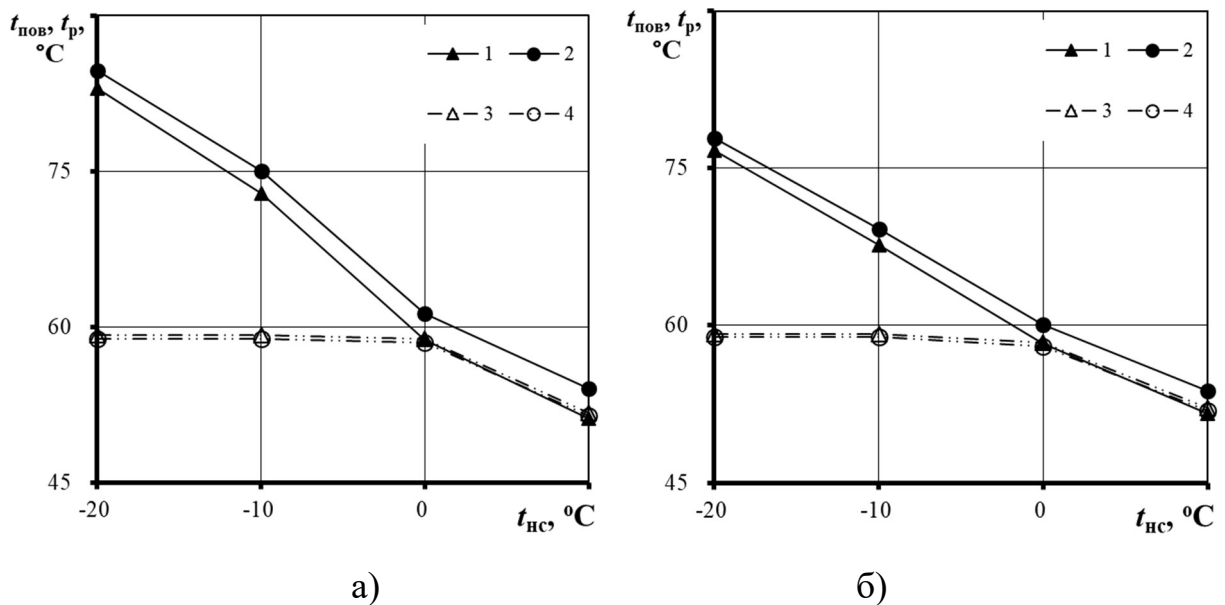


Рис. 4.16. Залежність від температури навколишнього середовища  $t_{\text{нс}}$  температури поверхні  $t_{\text{пов}}$  в гирлі димової труби зі вставним стволом з товщиною шару повітря  $\delta = 0,1$  м (1, 2) і точки роси  $t_{\text{р}}$  (3, 4) за різних температур  $t^f_{\text{вх}}$  та вологовмісті  $0,15$  кг/кг с.г. димових газів на вході в СТУ та часток підмішуваного повітря  $\sigma$ :

а)  $t^f_{\text{вх}} = 250$   $^{\circ}\text{C}$ ; б)  $t^f_{\text{вх}} = 200$   $^{\circ}\text{C}$ ; 1, 3 –  $\sigma = 0\%$ ; 2, 4 –  $2\%$ .

Рис. 4.17 ілюструє закономірності зміни тепловологісних режимів в димовій трубі зі вставним газовідвідним стволом при застосуванні розглянутого комплексу методів на основі аналізу закономірностей зміни значень  $\Delta t = t_{\text{пов}} - t_{\text{р}}$ .

Як свідчать отримані результати, для дотримання тепловологісного режиму в розглянутій димовій трубі за відсутності конденсатуутворення максимальна ефективна частка  $\sigma_{\text{эф}}$  підмішуваного повітря не перевищує 4 %. При цьому витрати теплоти на реалізацію методу не є більшими за 2%.

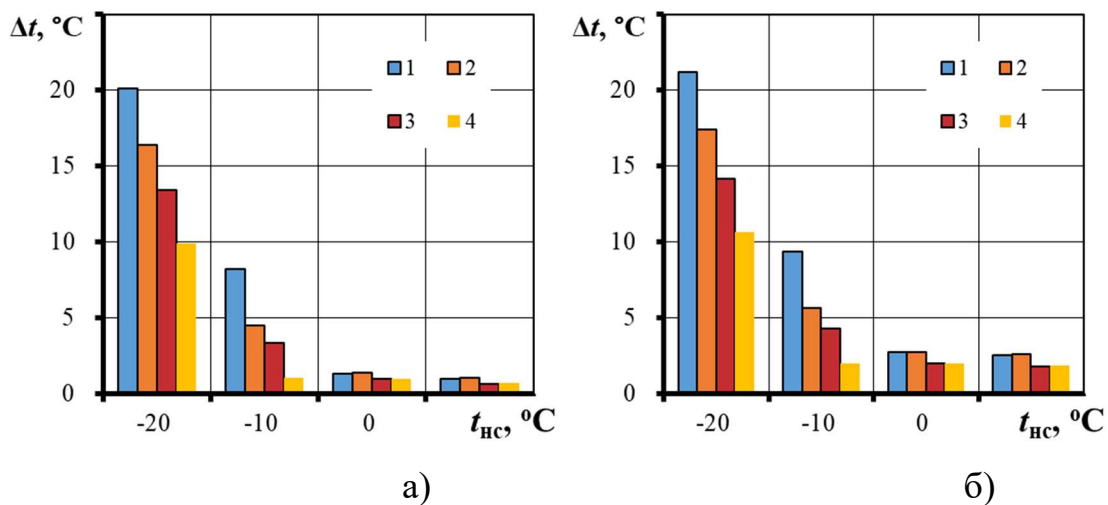


Рис. 4.17. Залежність від температури навколишнього середовища  $t_{\text{нс}}$  різниці температур  $\Delta t = t_{\text{пов}} - t_{\text{р}}$  за різних температур  $t_{\text{вх}}^{\text{г}}$  та вологовмісту  $X_{\text{вх}}^{\text{г}}$  димових газів на вході в теплоутилізаційну систему при наявності вставного ствола за різних значень часток підмішуваного повітря та товщині

повітряного прошарку  $\delta = 0,1$  м:

а)  $\sigma = 1\%$ ; б)  $\sigma = 2\%$ ;

1 –  $t_{\text{вх}}^{\text{г}} = 250$  °C;  $X_{\text{вх}}^{\text{г}} = 0,20$ ; 2 –  $t_{\text{вх}}^{\text{г}} = 250$  °C;  $X_{\text{вх}}^{\text{г}} = 0,25$ ; 3 –  $t_{\text{вх}}^{\text{г}} = 200$  °C;  $X_{\text{вх}}^{\text{г}} = 0,20$ ; 4 –  $t_{\text{вх}}^{\text{г}} = 200$  °C;  $X_{\text{вх}}^{\text{г}} = 0,25$ .

Отже, за результатами виконаних досліджень за умов використання розглянутих варіантів комплексу теплових методів, а саме повітряного та зменшення теплових втрат в навколишнє середовище з поверхні залізобетонної димової труби, реалізується безпечний режим її експлуатації за відсутності випадення в ній конденсату.

#### **4.4 Принципові положення щодо застосування теплових методів запобігання конденсацію в димових трубах сміттєспалювальних установок**

На основі виконаних досліджень можна сформулювати основні положення, яких необхідно дотримуватись при розробленні та впровадженні для сміттєспалювальних установок теплоутилізаційних технологій з системами захисту газовідвідних трактів від конденсації.

1. Проектування теплоутилізаційних технологій для сміттєспалювальних установок повинно здійснюватись із забезпеченням високої ефективності теплоутилізації відхідних газів (з використанням теплоти конденсації водяної пари, що міститься в газах) та з урахуванням наявних потреб в утилізованій теплоті. Дані системи мають включати системи теплового захисту газовідвідних трактів для запобігання їх корозії внаслідок конденсації при реалізації глибокого охолодження димових газів.

2. Розроблення заходів антикорозійного захисту газовідвідних каналів повинно здійснюватись з урахуванням виду теплоутилізаційної технології та типів застосовуваних димових труб.

3. За умов застосування різних теплоутилізаційних технологій при використанні димових труб з низькими теплоізоляційними властивостями корпусу (металевих та залізобетонних без футерування) рекомендується використовувати: метод зменшення теплових втрат з корпусу димових труб шляхом внутрішньої чи зовнішньої теплоізоляції їхнього корпусу, або здійснювати реконструкцію цих труб шляхом монтування в труби вставного газовідвідного ствола.

3.1. Товщина теплоізоляції визначається теплофізичними та конструкційними характеристиками застосовуваного матеріалу, технологією його нанесення, конструкційними параметрами димових

труб, режимами експлуатації сміттєспалювальної установки з системою теплоутилізації.

3.2. При використанні вставного газовідвідного ствола ширина повітряного прошарку між оболонкою труби та вставним стволом в основному визначається технологічними потребами щодо забезпечення необхідної швидкості в трубі для покращення умов розсіювання шкідливих викидів та технічною можливістю монтування ствола.

4. При використанні комбінованих теплоутилізаційних систем з глибоким охолодженням димових газів та які комплектуються повітрянагрівачами для забезпечення умов експлуатації димових труб за відсутності конденсатоутворення на їхніх внутрішніх поверхнях рекомендовано застосування комплексу теплових методів. Комплекс включає окрім теплового методу зменшення теплових втрат з поверхні труби в навколишнє середовище ще і повітряний метод тепловологісної обробки скидних газів після теплоутилізації. При цьому:

4.1. Проектування повітрянагрівачів теплоутилізаційної системи повинно здійснюватись з урахуванням витрат та необхідної температури повітря на реалізацію повітряного методу.

4.2. Для реалізації повітряного методу в теплоутилізаційній установці повинна бути передбачена можливість регульованого додавання частини повітря, нагрітого в повітрянагрівачі теплоутилізаційної системи у відповідний газовий канал перед димовою трубою.

4.3. Орієнтовна частка доданого повітря змінюється в межах від 0 до 5%, а в окремих ситуаціях і більше від витрати димових газів.

5. Для забезпечення умов експлуатації димових труб за відсутності конденсатоутворення в їх гирлі повинна дотримуватись умова перевищення на 2 - 3 °С температури внутрішньої поверхні над точкою роси вихідних димових газів.

6. При проектуванні систем теплоутилізації необхідно виконувати розрахунок показників розсіювання димовими трубами сміттєспалювальних

установок шкідливих речовин в навколишньому середовищі. За необхідності покращення умов довкілля частки підмішуваного повітря можуть бути більшими за 5% (за необхідності підвищення температури вихідних газів для забезпечення нормативного розподілу в просторі і часі шкідливих викидів).

7. При проектуванні теплоутилізаційних систем має бути розглянута можливість корисного використання конденсату, утвореного при глибокому охолодженні димових газів.

8. За відсутності потреби в утвореному конденсаті на підприємствах термічного знешкодження побутових відходів та за їх межами повинна бути передбачена декарбонізація цього конденсату до рівня  $\text{pH} = 7,5 \dots 8,5$ , що дозволить відведення його до каналізаційних стоків.

9. При розробленні теплоутилізаційних технологій з системами антикорозійного захисту газовідвідних трактів повинні дотримуватись чинні норми щодо проектування та встановлення відповідного теплоутилізаційного устаткування.

## ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 4

Досліджено ефективність використання для антикорозійного захисту димових труб сміттєспалювальної установки шляхом запобігання в них випадення конденсату теплого методу зменшення втрат теплоти з поверхні корпусу димової труби в навколишнє середовище (шляхом теплоізолювання корпусу димової труби чи монтування в неї вставного газовідвідного ствола). Показано, що:

- метод не забезпечує відвернення конденсатуутворення в гирлі димової труби у всіх режимах роботи розглянутої сміттєспалювальної установки. Запобігання конденсатуутворенню реалізується лише за від'ємних температур атмосферного повітря для усіх розглянутих температур та вологовмістів відхідних газів після сміттєспалювального агрегату (на вході в систему теплоутилізації);

- рекомендовані параметри теплоізоляційного матеріалу (коефіцієнт теплопровідності та товщина) визначається конструкційними особливостями ізоляційного матеріалу, його вартістю та технологією нанесення на поверхню корпусу димової труби;

- діаметр вставного газовідвідного ствола визначається технічними можливостями монтування ствола та вимогами щодо швидкості в димовій трубі для забезпечення необхідного гідравлічного режиму та покращення умов розсіювання шкідливих викидів димових газів.

2. Встановлено закономірності зміни показників тепловологісного стану (точки роси  $t_p$  та температури внутрішньої  $t_{пов}$  поверхні в гирлі димових труб) за різних режимів їхньої експлуатації у разі використання комплексу двох теплових методів, а саме: повітряного методу та розглянутого методу теплових втрат в навколишнє середовище. За результатами аналізу вказаних

показників показано, що використання комплексу методів забезпечує режим експлуатації димових труб за відсутності в них конденсатоутворення в усіх режимах експлуатації сміттєспалувальної установки з водогрійним опалювальним агрегатом. При цьому частка підмішуваного повітря  $\sigma$  не перевищує 5 % коефіцієнт витрат теплоти на реалізацію комплексу не перевищує 2%.

3. Розроблено принципові положення щодо створення для установок спалювання ТПВ, призначених для забезпечення потреб опалення, теплоутилізаційних технологій з системами запобігання конденсатоутворенню в газовідвідних трактах. Ці системи базуються на застосуванні комплексу двох теплових методів: повітряного та зменшення теплових втрат з поверхні димової труби в навколишнє середовище шляхом теплоізоляції труби або монтування в неї вставного газовідвідного ствола.

## ВИСНОВКИ

1. Виконано комплекс досліджень тепловологісного стану газовідвідних трактів установок спалювання ТПВ з комбінованими системами утилізації їх теплових викидів та проведено аналіз ефективності застосування низки теплових методів відвернення конденсатоутворення у цих трактах.

2. Одержано данні щодо тепловологісних характеристик димових труб установок спалювання ТПВ при застосуванні технології утилізації їх теплових викидів з використанням утилізованої теплоти для нагрівання дуттьового повітря та зворотної тепломережевої води. За результатами досліджень показано, в усіх режимах експлуатації сміттєспалювальних установок температура внутрішньої поверхні у гирлі є значно нижчою точки роси, що свідчить про наявне конденсатоутворення в трубі. Отже, для запобігання вказаного конденсатоутворення необхідним є застосування спеціальних теплових методів тепловологісної обробки димових газів після теплоутилізації та зменшення теплових втрат з поверхні труби.

3. Виконано оцінку ефективності методу зменшення втрат теплоти з поверхні корпусу димової труби в навколишнє середовище шляхом її теплоізоляції або розміщення газовідвідного ствола в широкому діапазоні зміни навантажень сміттєспалювальної установки і вологовмісту димових газів перед теплоутилізаційною системою (0,15 – 0,25 кг/кг с.г.). Встановлено, що запобігання конденсатоутворенню в димовій трубі реалізується лише за від'ємних температур атмосферного повітря для усіх вказаних вологовмістів димових газів.

4. Для методу пропускання частини димових газів котла повз теплоутилізаційну установку (метод байпасування) виявлено закономірності зміни тепловологісного режиму в газовідвідному тракті сміттєспалювальної установки в залежності від частки байпасування вихідних газів, їх вологовмісту перед теплоутилізатором і температури атмосферного повітря.

Так достатнім являється використання одного шару вибраної теплоізоляції при частці підмішуваного повітря, що не перевищує 10% від загальної витрати повітря, нагрітого в повітропідігрівачі. Встановлено, що при встановленні ствола в димовій трубі, максимальна частка підмішуваного повітря лише дещо перевищує 2%

8. За результатами порівняльного аналізу ефективності розглянутих теплових методів запобігання конденсації в газівідвідних трактах сміттєспалювальних установок встановлено, що за величиною витрат теплоти на реалізацію методу найефективнішою є комбінація повітряного методу та методу теплоізоляції димової труби або монтування в ній вставних стволів, меншою ефективністю характеризується повітряний метод. Ще меншу ефективність демонструє метод підігрівання димових газів після теплоутилізатора в теплообміннику газопідігрівачі і найменшу метод байпасування димових газів повз теплоутилізатор. Вказані витрати теплоти ранжуються таким чином 5%, 10%, 25% та більше 50% від утилізованої теплоти.

9. Розроблено та передано зацікавленим організаціям рекомендації, щодо впровадження на сміттєспалювальних установках теплоутилізаційних систем оснащених засобами відведення конденсації в газівідвідних трактах цих установок. Застосування таких систем забезпечує підвищення коефіцієнта використання палива на 3 – 9 % при терміні окупності витрат, що не перевищує 3,5 роки.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Крот О. П. Моделювання та оптимізація процесів термічного знешкодження побутових і промислових відходів у теплогенеруючих установках: дис. ... д-ра тех. наук: 05.23.03 / Харківський нац. універ. буд. та архіт., Харків, 2019. 329 с.
2. Waste to Energy: A Technical Review of Municipal Solid Waste Thermal Treatment Practices – Final Report, Stantec, 2011. 88p.
3. H. Lanier Hickman. Jr. American Alchemy: The History of Solid Waste Management in the United States. Santa Barbara: Forester Press, 2003. 597 p.
4. Niessen W.R. Combustion and incineration processes. New York: Basel Dekker, 2002. 715p.
5. Королев В.Н., Редько А.Ф., Худенко А.А. Интенсификация внешнего теплообмена в псевдосжиженном слое: монография. Харьков, 2002. 192с.
6. J. Malinauskaite, H. Jouhara, D. Czajczyńska, P. Stanchev, E. Katsou, P. Rostkowski, R. J. Thorne, J. Colón, S. Ponsá, F. Al-Mansour, L. Anguilano, R. Krzyżyńska, I. C. López, A. Vlasopoulos, N. Spencer. Municipal solid waste management and waste-to-energy in the context of a circular economy and energy recycling in Europe. Energy. 2017. Vol. 141. P. 2013-2044. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.11.128>
7. Samuel NM de Souza, Mika Horttanainen, Jhonatas Antonelli, Otávia Klaus, Cleber A Lindino, Carlos EC Nogueira. Technical potential of electricity production from municipal solid waste disposed in the biggest cities in Brazil: Landfill gas, biogas and thermal treatment. Waste Management & Research. 2014. Vol. 32(10). P. 1015-1023. <https://doi.org/10.1177/0734242X14552553>
8. Тарадай А. М., Кириленко И. Г., Редько А. Ф. Тенденция развития централизованного и децентрализованного теплоснабжения. Науковий вісник будівництва. 2008. Вип. 45. С. 182-186.

9. Редько А., Редько А., Компан А., Павловский С. Математическое моделирование параметров утилизационной энергетической установки с органическим теплоносителем. MOTROL–Motoryzacja i Energetyka Rolnictwa, 2013. Вип. 15. №6. С. 51-58.
10. Редько А. Ф., Тарадай А. М., Чернокрылюк В. В., Есин Е. С. Комбинированные системы теплоснабжения с возобновляемыми источниками тепла. Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. 2014. Is. 10 (129). С. 42-46.
11. Hussam Jouhara, Navid Khordehghah, Sulaiman Almahmoud, Bertrand Delpech, Amisha Chauhan, Savvas A.Tassou. Waste heat recovery technologies and applications. Thermal Science and Engineering Progress. 2018. Vol. 6. P. 268-289. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2018.04.017>
12. Guide to Energy Management / by Barney L. Capehart, Wayne C. Turner, William J. Kennedy. – 7th ed. 2012. 651p.
13. Nicholson R. Recuperative and regenerative techniques. Heat Recorery Systems. 1983. №3(5). P. 385-404. [https://doi.org/10.1016/0198-7593\(83\)90053-X](https://doi.org/10.1016/0198-7593(83)90053-X)
14. Крот О.П. Waste-to-energy – технология преобразования отходов в энергию. Вагонный парк, 2017. № 9-10(126-127). С. 39-42.
15. Крот О.П., Винниченко В.И. Мельницы-сушилки: ресурсо- и энергосбережение // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы междунар. науч.-техн. конф., 26–27 апреля 2018 г., Могилев, БРУ, 2018. С. 200-201.
16. Крот О.П., Вінниченко В.І. Використання теплоти згоряння твердих побутових відходів на сміттєспалювальній установці для обробки фосфогіпсу// Технології та інфраструктура транспорту: тези доповідей міжнародної науково-технічної конференції, 14–16 травня 2018. Харків: «УкрДУЗТ», 2018. С. 347-348.
17. Yodrak Lerchai, Rittidech Sampan, Nattapol Poomsa-ad, Meena Pattanapol. Waste heat recovery by heat pipe air-preheate to energy thrift from the

furnace in a hot forging process. American Journal of Applied Sciences. 2010. vol. 7 (5). P.675-681.

18. Arvind C. Thekdi, Sachin U. Nimbalkar, Industrial Waste Heat Recovery: Potential Applications, Available Technologies and Crosscutting R&D Opportunities/A report prepared by E3M Inc., 2014. 72p.

19. Ray H.S., Singh B.P., Bhattacharjee S., Misra V.N. Energy in minerals and metallurgical industries / 1st ed., Allied Publishers Limited. Delhi, 2005. 521p.

20. William D. Cotter. A guide to heat exchangers for industrial heat recovery, The New York State Energy Research and Development Authority. New York, 1984. 22 p.

21. S.D. Knežević, R.M. Karamarkovic, V.M. Karamarkovi, N.P. Stojic, Radiant recuperator modeling and design, Thermal Science. 2017. 21 (2). P. 1119-1134.

22. Vladan Karamarković, Miljan Marašević, Rade Karamarkovic, Miodrag Karamarković. Recuperator for waste heat recovery from rotary kilns. Applied thermal engineering. 2013. 54(2). P. 470-480.  
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.02.027>

23. Shah R.K., Sekulic D.P. Fundamentals of Heat Exchanger Design / 1st ed., John Wiley & Sons Inc. Hoboken, 2003. 941 p.

24. Yigit Ilgaz. Thermal Energy Equipment: Waste Heat Recovery. Energy Efficiency Guide for Industry in Waste Heat Recovery, Energy Efficiency Guide for Industry in Asia, 2006. 18 p.

25. Wolfgang Rommel, Thorsten Freudenberger, Markus Hertel, Thomas Moritz. Retrofitting of an Existing Waste Incineration Plant with a District Heating Network. Enhancing of the Energy Efficiency of an Existing Waste Incineration Plant by Retrofitting with a District Heating Network. Waste Incineration. B.A.U.M. Consult GmbH: Integriertes Klimaschutzkonzept für den Landkreis Neu-Ulm., 07.01.2013. P. 201-219.

26. Michael Becida, Rahul Anantharaman. Dual-fuel Cycles to Increase the Efficiency of WtE Installations. *Chemical Engineering Transactions*, 2012. Vol. 29, P. 727-732. <https://doi.org/10.3303/CET1229122>
27. Seksan Udomsri, Andrew R. Martin, Torsten H. Fransson. Economic assessment and energy model scenarios of municipal solid waste incineration and gas turbine hybrid dual-fueled cycles in Thailand. *Waste Management*. 2010. Vol. 30 P. 1414-1422.
28. Heron Kleis, Soren Dalager. 100 years of waste incineration in Denmark. From Refuse Destruction Plants to High-technology Energy Works. Babcock and Wilcox Volund, Ramboll, 2004. 50p.
29. Changkook Ryu, Donghoon Shin. Combined Heat and Power from Municipal Solid Waste: Current Status and Issues in South Korea. *Energies*, 2013, Vol. 6. P.45-57. <https://doi.org/10.3390/en6010045>
30. National Research Council. (2000). Waste incineration and public health. ISBN: 0-309-50446-5, 364 pages (Waste Incineration and Public Health is available from the National Academy Press, 2101 Constitution Ave., NW, Box 285, Washington, DC 20055. <https://doi.org/10.17226/5803>
31. Johnke B. Emissions from waste incineration. *Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories*. 2000. P. 455-468.
32. Андреюк В. С. Повышение эксплуатационной надежности промышленных труб. *Редакционная коллегия*, 2015. С. 369-378.
33. Войцехівський О. В., Попов В. О., Дорохова Н. Д. Інноваційні технології улаштування і реконструкції залізобетонних димових труб. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. 2017. № 2. С. 13-18.
34. Войцехівський О. В., Попов В. О., Дорохова Н. Д. Інноваційні технології улаштування і реконструкції залізобетонних димових труб. *Матеріали конференції «XLVII Науково-технічна конференція підрозділів Вінницького національного технічного університету (2018)»*, Вінниця, 2018.

<https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/allvntu/index/pages/view/zbirn2>

35. Яблонько Е. В. Основные проблемы в эксплуатации дымовых труб. *Молодой ученый*. 2011. №9. С. 65-68.

36. Будівельні підприємства «Спецвисотмонтаж».  
<https://altius.com.ua/ua/perechen-vida-rabot/115-remont-modernizacziya-demontazh-dymovyx-trub/>.

37. Фіалко Н. М., Навродська Р. О., Шевчук С. І., Степанова А. І., Сбродова Г. О. Подовження ресурсу димових труб котельних при застосуванні вставних газовідвідних стволів. *Міжнародний науковий журнал "Інтернаука"*. 2020. №5. С. 79-82. <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2020-5>

38. Глуховский В. Ю., Бондаренко О. Г. Особенности диагностики технического состояния промышленных дымовых труб пассивным тепловизионным методом. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*. № 3. 2019. С. 36-45

39. Глуховский В. Ю. Застосування тепловізійного контролю для моніторингу технічного стану промислових димових труб. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*. 2015. № 1. С. 55-59.

40. Корсун В. И. О предупреждении аварийных ситуаций на промышленных дымовых и вентиляционных трубах. *Будівельні конструкції*. 2014. № 81. С. 244-253.

41. Яровий С. М. Типологія дефектів та пошкоджень металевих димових і вентиляційних труб, статистичний аналіз пошкоджуваності. *Науковий вісник будівництва*. 2020. № 99.1. С. 213-221.

42. Яровой С. Н. Долговечность и остаточный ресурс металлических дымовых труб с учетом температурного и коррозионного воздействия. *Науковий вісник будівництва*. 2017. № 2 (88). С. 110-114.

43. Dahl, L. Dewpoint corrosion - a literature review. *Kondenskorrosion - en litteraturstudie*. Sweden. <https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/7803242>

44. Mlčoch, J., & Sýkora, M. (2020). Determining Criteria for Assessment of RC Structures Affected by Carbonation-Induced Corrosion. *Key Engineering Materials*, 868, 3-9.

<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.868.3>

45. Bordzilowski, J. and Darowicki, K. (1998), "Anti-corrosion protection of chimneys and flue gas ducts", *Anti-Corrosion Methods and Materials*, Vol. 45 No. 6, pp. 388-396. <https://doi.org/10.1108/00035599810236243>

46. Фіалко Н. М., Навродська Р. О., Шевчук С. І., Пресіч Г. О., Гнедаш Г. О. Теплові методи захисту газовідвідних трактів котельних установок підчас застосування теплоутилізаційних технологій. *Науковий вісник НЛТУ України*. Львів. 2017. т. 27, № 6. С. 125-130.

<https://doi.org/10.15421/40270625>

47. Фиалко Н. М., Навродская Р. А., Гнедаш Г. А., Шевчук С. И., Дашковская И. Л. Осушение дымовых газов котельных установок в конденсационных теплоутилизаторах. *Международный научный журнал "Интернаука"*. 2019. № 15. С. 109-111. <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2019-15>

48. Fialko N. M., Shevchuk S. I., Stepanova A. I., Gnedash G. O., Dashkovska I. L. Heat methods of protection for gas-outlet channels of boiler plants. *Міжнародна мультидисциплінарна конференція «Наука і техніка сьогодення: пріоритетні напрямки розвитку України та Польщі» м. Воломін 19-20 жовтня 2018 р.* С.129-133. ISBN 978-9934-571-55-8

49. Фиалко Н. М., Навродская Р. А., Шевчук С. И., Пресич Г. А., Гнедаш Г. А., Глушак О. Ю. Тепловые методы защиты газоотводящих трактов котельных установок с глубоким охлаждением дымовых газов. *"Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии" серия "Технические и естественные науки"*. 2014. №2 (15). С. 13-17.

50. Fialko N., Navrodska R., Shevchuk S., Presich G., Gnedash G. The use of thermal methods to protect the exhaust channels of boilers equipped with

heat-recovery units. *International scientific journal "Internauka"*. 2019. № 11(73), том 2, С. 14-16. <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2019-11>

51. Шевчук С. І. Підвищення ефективності застосування теплових методів захисту газовідвідних трактів котельних установок з конденсаційними теплоутилізаторами: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.14.06 "Технічна теплофізика і промислова теплоенергетика". Київ, 2011. 20 с.

52. Фиалко Н. М., Навродская Р. А., Пресич Г. А., Гнедаш Г. А., Шевчук С. И., Степанова А. И. Тепловые методы защиты газоотводящих трактов котельных установок: монография.: Київ: «Про формат». 2018. 248 с.

53. N. Fialko, R. Navrodska, S. Shevchuk, G. Presich, G. Gnedash. Запобігання конденсатоутворенню в димових трубах котельних установок з системами теплоутилізації. *Енергетика і автоматика*. 2021, №4, С. 5-17. <http://dx.doi.org/10.31548/energiya2021.04.005>

54. Fialko N.M., Navrodska R.O., Gnedash G.O., Presich G.O., Shevchuk S.I. Methods for protecting boiler chimneys against corrosion due to fall-out condensate from flue gases. *Международный научный журнал «Интернаука»*. 2021. № 9(109). С.30-32. <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2021-9-7426>

55. Фіалко Н.М., Навродська Р.О., Шевчук С.І., Пресіч Г.О. Аналіз ефективності систем захисту газовідвідних трактів котельних установок при застосуванні теплоутилізаційних технологій. *Промышленная теплотехника*. 2016, т.38 №1. С.47-53.

56. Фіалко Н.М., Навродська Р.О., Шевчук С.І., Гнедаш Г.О., Сбродова Г.О. Застосування повітряного методу запобігання конденсатоутворенню в газовідвідних трактах котелень. *Науковий вісник НЛТУ України*, 2018, т. 28, № 10. С. 76-80. <https://doi.org/10.15421/40281016>

57. Пресич Г. А. Обеспечение надежной работы газового тракта котельных установок с теплоутилизаторами. *Промышленная теплотехника*. 2000. Т. 23, №6. С. 110-115.

58. N. M. Fialko, R. O. Navrodska, S. I. Shevchuk, A. I. Stepanova. Improvement of environmental conditions by applying heat recovery technologies of boiler plants. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2021. № 6. P. 148-152. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-6/148>

59. N.M. Fialko, R. O. Navrodska, S. I. Shevchuk, G. O. Gnedash. The environmental reliability of gas-fired boiler units by applying modern heat-recovery technologies. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2020. № 2. P. 96-100. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2020-2/096>

60. Фіалко, Н. М., Прокопов, В. Г., Навродська, Р. О., Шевчук, С. І., & Пресіч, Г. О. Аналіз екологічної ефективності димових труб котельень за умов застосування теплоутилізаційних технологій. *Scientific Bulletin of UNFU*. 2020. 30(4), 104-108. <https://doi.org/10.36930/40300418>

61. Фіалко Н. М., Навродська Р. О., Пресіч Г. О., Гнедаш Г. О., Шевчук С. І., Мартюк О. В. Підвищення екологічної ефективності комплексних теплоутилізаційних систем котельних установок. *Промислова теплотехніка*. 2018. Т. 40, № 2. С. 27-32. <https://doi.org/10.31472/ihe.2.2018.04>

62. N. Fialko, R. Navrodska, S. Shevchuk, R. Serhiienko, G. Gnedash. Підвищення екологічної безпеки димових труб котельних установок. *Енергетика і автоматика*. 2022. №2. С. 5-14. <http://dx.doi.org/10.31548/energiya2022.05.005>

63. Туз В., Лебедь Н., Литвиненко М. Багатофакторність процедури оптимізації конструкції витого теплообмінника, розташованого в кільцевому каналі при ламінарному русі. *Енергетичні технології та ресурсозбереження*. 2023. Т. 74, №1. С. 80–91. <http://dx.doi.org/10.33070/etars.1.2023>

64. Кобзар С. Г., Гапонич Л. С., Борисов І. І., & Халатов А. А. Огляд вихрових технологій утилізації низько- та середньокалорійних газів у технологіях waste-to-energy та waste-to-gas. *Відновлювана енергетика*. 2025. Т. 82, № 3. С. 234–252. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.3\(82\).234-252](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.3(82).234-252)

65. Haronych L., Kobzar S., Holenko I. Ecological Aspects of Using Co-Incineration of RDF/SRF with Fossil Fuels in Waste-To-Energy Technologies. In:

Babak, V., Zaporozhets, A. (eds) Systems, Decision and Control in Energy VII. Studies in Systems, Decision and Control. 2025. Vol 595. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-90466-0\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-031-90466-0_13)

66. Фіалко Н. М., Прокопов В. Г., Навродська Р. О., Шевчук С. І., Пресіч Г. О. Особливості застосування теплоутилізаційних технологій для газоспоживальних скловарних печей. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2021. Т. 31, № 4. С. 109–113. <https://doi.org/10.36930/40310418>

67. Путрик С. Б., Баскаков А. П. Расчет температурно-влажностного режима газоотводящего тракта с учетом уноса из теплоутилизаторов. *Промышленная энергетика*. 2006. № 9. С. 36–39.

68. Кузнецов Н. В., Митор В. В., Дубовский И. Е. Тепловой расчет котельных агрегатов. Нормативный метод. Издательство Эколит. 2011. 296 с.

69. РТМ 108.030.140-87. Расчет и рекомендации по проектированию поперечно-оребранных конвективных поверхностей нагрева стационарных котлов. [Действующий от 01-07-88]. Изд. офиц. Министерство тяжелого, энергетического и транспортного машиностроения. 1987. 29 с.

70. Фіалко Н. М., Гомон В. И., Навродская Р. А., Прокопов В. Г., Пресіч Г. А. Особенности методики расчета поверхностных теплоутилизаторов конденсационного типа. *Промышленная теплотехника*. 2000. № 2. С. 49–53.

71. Fialko N., Stepanova A., Navrodska, R., Gnedash G., Shevchuk S. Complex methods for analysis of efficiency and optimization of heat-recovery system. *Scientific and innovation*, 2021. Vol. 17, № 4, P. 11–18. <https://doi.org/10.15407/scine17.04.011>

72. Жидович О. В., Альшевский В. Н., Дужих Ф. П. Охлаждение газов в дымовых трубах. *Теплоэнергетика*. 1977. № 9. С. 44–47.

73. Fialko N., Gnedash G., Shevchuk S., Novakivskii M. Ensuring reliable operation of chimneys during the use of boiler plants with water heat-recovery exchangers. *Scientific research in the modern world. Proceedings of the*

*5th International scientific and practical conference. Perfect Publishing. Toronto, Canada. 2023. P. 119–124.*

74. Fialko N., Navrodska R. Modernization of the complex heat-recovery unit for heating and humidifying the combustion air of gas-fired boiler plants. In: *The 12 th International scientific and practical conference “Science, innovations and education: problems and prospects” (June 28-30, 2022) CPN Publishing Group, Tokyo, Japan. 2022. P. 174–179.*

75. Basok B.I., Davydenko B.V., Pavlenko A.M., Kuzhel L.M., Novikov V.H., Goncharuk S.M., Iliencko B.K., Nikitin Ye.Ye., Veremiichuk H.M. Reduced Heat Loss through Window Structures. *Energy Technologies & Resource Saving*. 2023. Vol. 76, № 3. P. 43–57. <https://doi.org/10.33070/etars.3.2023.04>

76. Koshlak H., Basok B., Davydenko B. Heat Transfer through Double-Chamber Glass Unit with Low-Emission Coating. *Energies*. 2024. Vol. 17, № 5, Article 1100. <https://doi.org/10.3390/en17051100>

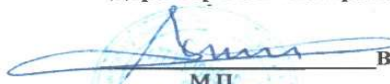
77. Туз В., Лебедь Н., Литвиненко М. Удосконалення методики розрахунку гідродинаміки вітих теплообмінників для кріогенних установок, які працюють за циклом J-T. *Енергетичні технології та ресурсозбереження*. 2024. Т. 79, № 2. С. 126–137. <https://doi.org/10.33070/etars.2.2024.09>

78. Фиалко Н. М., Навродская Р. А., Пресич Г. А., Новаковский М. А., Гнедаш Г.А., Шевчук С. И., Сбродова Г. А. Комбинированные теплоутилизационные системы котлов с повышенным влажосодержанием отходящих газов. *Технологические системы*. 2016. №4 (77). С. 94–103.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор ТОВ «Техпромсервіс ЛТД»

10.12 2024



В.В. Косенко

М.П.  
"10" "12" 2024 р.

АКТ

про впровадження результатів роботи

Інституту технічної теплофізики (ІТТФ) НАН України

Даний акт складено про те, що підприємством ТОВ «Техпромсервіс ЛТД» прийнято до впровадження результати роботи ІТТФ за проектом «Розроблення технічних засад нової високоефективної технології спалювання штучних палив з твердих побутових відходів та біомаси у когенераційних енергоустановках з використанням водню, кисню, синтетичного та біометану для забезпечення енергетичної безпеки України». Згідно з проектом розроблено нову ефективну технологію утилізації скидної теплоти установок спалювання твердих побутових відходів та палив з них, що забезпечує підвищення ефективності використання палива на 5-8%. Технологія базується на використанні водо- та повітрянагрівних теплообмінників пластинчастого типу. Для захисту робочих поверхонь цих теплообмінників від корозійного та ерозійного зношування наносяться захисні покриття, що формуються методом металізації. Підприємство ТОВ «Техпромсервіс ЛТД» зацікавлене у виготовленні теплоутилізаційного устаткування розробленої інститутом теплоутилізаційної технології. Для цього на підприємстві створена відповідна виробнича база.

Будівництво нових сміттеспалювальних підприємств з використанням розробленої теплоутилізаційної технології дозволяє суттєво скоротити витрати палива на виробництво теплоенергії в традиційній комунальній теплоенергетиці та покращити стан довкілля завдяки зменшенню обсягів сміттєвих звалищ.

Від ІТТФ НАН України

Від ТОВ «Техпромсервіс ЛТД»

Зав. відділу ІТТФ НАН України,  
чл.-кор. НАН України

Головний інженер



Н.М. Фіалко



А.В. Білоруков

Пров. наук. співробітник, к.т.н.



Р.О. Навродська