

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ОДЕСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ОДЕСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ПОЗДНЯКОВА ГАННА ІВАНІВНА

УДК 620.9 049.34: 620.91:658.264

ДИСЕРТАЦІЯ

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТА НАДІЙНОСТІ РОБОТИ СИСТЕМ
ЦЕНТРАЛІЗОВАНОГО ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ В КОМУНАЛЬНІЙ ТЕ-
ПЛОЕНЕРГЕТИЦІ**

Спеціальність 144 – Теплоенергетика
Галузь знань 14 – Електрична інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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

_____ Г.І. Позднякова

Науковий керівник Климчук О.А., доктор технічних наук, професор

Одеса – 2026

АНОТАЦІЯ

Позднякова Г.І. Підвищення ефективності та надійності роботи систем централізованого теплопостачання в комунальній теплоенергетиці. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 144 – Теплоенергетика. – Національний університет «Одеська політехніка», МОН України, Одеса, 2026.

Дисертаційна робота присвячена підвищенню ефективності та надійності роботи об'єктів генерації теплоти систем централізованого теплопостачання житлово-комунального сектору з урахуванням режимів роботи основного обладнання, зовнішніх кліматичних чинників та екстремальних умов експлуатації. Запропоновані методи та рекомендації здатні суттєво підвищити надійність енергозабезпечення основного та допоміжного обладнання систем теплопостачання, а також покращити ефективність використання первинних енергоресурсів та зменшити вплив на навколишнє середовище.

У **вступі** обґрунтовано актуальність роботи, визначено мету дослідження, відповідно меті поставлені задачі дослідження, наведено наукову новизну, практичне значення результатів дослідження, відображено зв'язок дисертаційної роботи з науково-дослідними роботами та міжнародними грантами, що виконувались в Національному університеті «Одеська політехніка» за напрямом підвищення ефективності та надійності систем теплозабезпечення.

У **першому** розділі «Сучасні тенденції підвищення ефективності та надійності в системах теплопостачання комунального сектору» проведено аналіз сучасних напрямів щодо підвищення ефективності та надійності роботи систем теплопостачання як в Україні так і у світі, показано основні шляхи реалізації наведених постанов та директив ЄС та України щодо енергоефективності та зеленої енергетики. До основних результатів розділу можна віднести:

- на основі отриманих даних аналізу споживання енергоресурсів запропоновано основні шляхи щодо програми енергозбереження та удосконаленням енерготехнологій;

- виявлено основні шляхи щодо підвищення надійності енергопостачання систем централізованого теплозабезпечення об'єктів комунального господарства;

- показано перспективи впровадження когенераційних установок для енергозабезпечення об'єктів комунальної теплоенергетики.

У **другому** розділі «Шляхи підвищення надійності енергопостачання теплогенеруючих підприємств» наведено основні вимоги до сучасних систем теплопостачання з точки зору експлуатації, проведено дослідження щодо забезпечення надійності енергопостачання для стабільної роботи систем теплопостачання та визначення ймовірності відмов енергопостачання в екстремальних умовах експлуатації. До основних результатів розділу можна віднести:

- найперспективнішим з точки зору забезпечення енергопостачання є резервування за рахунок вбудованої в основну схему генерації тепла, систему генерації електроенергії, тобто повної або часткової когенерації;

- для невеликих систем теплопостачання можливе застосування недорогих автономних генераторів електроенергії на базі бензинових або дизельних генераторів;

- застосування газових турбін для підвищення надійності енергопостачання доцільне за великих потужностей електроспоживання в котельні теплогенеруючого підприємства, в котельнях з водогрійними котлами середньої потужності, або для незалежного електропостачання теплогенеруючого комплексу з більш дрібних котельнь;

- при використанні газових турбін в системі когенерації тепла та електроенергії, доцільно використовувати агрегати з невисокою температурою до 800 °С та тиском газу перед турбіною до 0,8 МПа, які відрізняються високою надійністю, невисокою вартістю та забезпечують максимальний відбір тепла, що утилізується;

- для оцінки на основі аналізу надійності роботи систем теплозабезпечення доцільно обирати метод експертних оцінок.

В **третьому** розділі «Підвищення надійності роботи джерел централізованого теплопостачання за рахунок застосування когенераційних установок» проведено аналіз підходів щодо підвищення надійності систем централізованого теплопостачання в умовах відключення електроенергії для районної опалювальної котельні з використанням когенераційних та теплонасосних технологій, запропоновано схемні рішення застосування когенераційних установок для сумісного видобутку теплоти та електроенергії. До основних результатів розділу можна віднести:

- розроблено математичну модель системи енергозабезпечення на базі газопоршневої когенераційної установки та моделі основних елементів системи теплопостачання;

- запропоновано комплекс критеріїв щодо оцінки енергетичної ефективності систем централізованого теплопостачання на базі районної опалювальної котельні з використанням когенераційних та теплонасосних технологій;

- виконано аналіз вхідних даних щодо моделювання режимів навантаження систем централізованого теплопостачання з надбудовою КУ, що базується на реальному проєкті модернізації системи централізованого теплопостачання м. Одеса.

В **четвертому** розділі «Результати досліджень основних заходів підвищення надійності енергозабезпечення систем теплопостачання» проведено дослідження роботи когенераційних установок на 6 котельнях м. Одеса, наведено основні варіанти підвищення надійності енергопостачання основних споживачів електроенергії котелень за рахунок резервування джерел електроживлення. До основних результатів розділу можна віднести:

- внаслідок нерівномірності добових графіків електричного та теплового навантаження споживачів коефіцієнт заповнення графіків має задовільне значення на рівні 0,53–0,61;

- КВП КУ нижче за номінальне значення приблизно на 10 %, що є наслідком нерівномірності добового навантаження та неповноти використання утилізованого тепла;

- задля підвищення коефіцієнта заповнення добових графіків навантаження доцільно збільшити одиничну номінальну потужність КУ при одночасному підк-

люченні до КУ більшої кількості різноманітних споживачів, графіки добового навантаження яких відрізняються та мають перекривати один одного.

— порівняльний аналіз резервних джерел теплоти для підвищення надійності енергозабезпечення котелень показав певну перевагу когенераційних установок за основними показниками.

Ключові слова: системи тепlopостачання, централізоване тепlopостачання, генератори теплоти, електроенергія, теплова енергія, житлово-комунальне господарство, надійність, енергоефективність, енергозбереження, когенераційні установки, теплові насоси, енергопостачання, комбіновані системи тепlopостачання, комбіноване енергозабезпечення, енергоресурси, експертні оцінки, геліосистеми, відновлювальні джерела енергії, математичне моделювання.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Наукові праці, в яких опубліковано наукові результати дисертації:

1. Babaev, E. Pozdniakova, G. 2023. Аналіз ефективності застосування геліо-систем в централізованих системах теплопостачання університету. Праці Одеського політехнічного університету. 2(68) (Груд. 2023), 64–71.

<https://doi.org/10.15276/opu.2.68.2023.08>.

(Реєстр наукових фахових видань України, категорія «Б»).

2. Mazurenko, A., Klymchuk, O., Pozdniakova, G., Pustovit, A. i Shavrov, V. 2024. Проблеми забезпечення надійного теплопостачання в умовах негарантованого електропостачання теплогенеруючим підприємствам. Праці Одеського політехнічного університету. 1(69) (Трав. 2024), 23–31.

<https://doi.org/10.15276/opu.1.69.2024.03>.

(Реєстр наукових фахових видань України, категорія «Б»).

3. Г.І. Позднякова, Є.С. Бабаєв. Шляхи підвищення енергоефективності теплопостачання районів міст за рахунок комплексної модернізації інженерних систем будівель. Refrigeration Engineering and Technology. Том 60 № 1 (2024), 45-52.

<https://journals.ontu.edu.ua/index.php/reftech/article/view/2735/3156>

4. Klymchuk, O. i Pozdniakova, G. 2024. Підвищення надійності роботи систем теплопостачання в умовах відключення електроенергії. Праці Одеського політехнічного університету. 2(70) (Груд. 2024), 48–54.

<https://doi.org/10.15276/opu.2.70.2024.06>.

(Реєстр наукових фахових видань України, категорія «Б»).

5. Anton Mazurenko, Anton Panda, Oleksandr Klymchuk, Ganna Pozdniakova, Anatoliy Pustovit, Jan Valicek, Marta Harnicarova. Stability of systems in extreme operating conditions. Mm science journal i 2025 i november. P 8916-8920.

https://doi.org/10.17973/MMSJ.2025_11_2025037

(Реєстр міжнародних наукометричних видань Scopus).

Опубліковані праці апробаційного характеру:

6. Лужанська Г.В. Бабаєв Є.С. Сергєєв М.І. Позднякова Г.І. Климчук І.О. Аналіз сучасного стану енергопостачання для комунальної енергетики в загальному енергетичному балансі країни. 9th International Scientific and Practical Conference THEORY AND PRACTICE OF SCIENCE: KEY ASPECTS ROME, ITALY February 19-20, 2024. p. 496-502.

<https://doi.org/10.51582/interconf.19-20.02.2024>

7. Климчук О. А., Позднякова Г. І. МОДЕРНІЗАЦІЯ ТЕПЛОВИХ МЕРЕЖ У ПОВОЄННИЙ ПЕРІОД. ПРОБЛЕМИ ЕКОЛОГІЇ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЇ ОБ'ЄКТІВ ЕНЕРГЕТИКИ. XXXIV міжнародна конференція “Проблеми екології і експлуатації об'єктів енергетики”. Збірник праць. ІВЦ АЛКОН. Київ 2024. стор.50-53.

https://ittf.kiev.ua/wp-content/uploads/2025/01/sbornik_2024_pp.pdf

8. Сігал О. І., Падерно Д. Ю., Позднякова Г. І. ЗАХОДИ З ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ РОБОТИ ТЕПЛОДЖЕРЕЛ СИСТЕМИ ЦЕНТРАЛІЗОВАНОГО ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ МІСТА ОДЕСИ В УМОВАХ ВОЄННОГО СТАНУ. XXXIV міжнародна конференція “Проблеми екології і експлуатації об'єктів енергетики”. Збірник праць. ІВЦ АЛКОН. Київ 2024. стор.65-68.

https://ittf.kiev.ua/wp-content/uploads/2025/01/sbornik_2024_pp.pdf

9. Позднякова Г.І. ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ СИСТЕМИ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ. 3rd International Scientific and Practical Conference «Modern Trends in the Development of Economy, Technology and Industry» Collection of Scientific Papers April 9-11, 2025 Toronto, Canada. стор. 307-311.

<https://doi.org/10.70286/ISU-09.04.2025>

10. Климчук О.А., Позднякова Г.І. ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ У СИСТЕМАХ КОМБІНОВАНОГО ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ. Тези доповідей XXXIII МІЖНАРОДНОЇ НАУКОВО-ПРАКТИЧНОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ: НАУКА, ТЕХНІКА, ТЕХНОЛОГІЯ, ОСВІТА, ЗДОРОВ'Я MicroCAD- 2025. Національний університет «Одеська політехніка», м. Одеса стор. 760.

<https://ndch.kpi.kharkov.ua/wp-content/uploads/2025/06/Zbirnik-tez-2025.pdf>

11. Климчук О.А., Позднякова Г.І. ВИКОРИСТАННЯ КОГЕНЕРАЦІЙНИХ УСТАНОВОК ДЛЯ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ. The materials of the conference 5th International Scientific and Practical Conference «Science And Information Technologies in The Modern World». Collection of Scientific Papers. February 11-13, 2026 Athens, Greece. стор. 420 – 422.

<https://doi.org/10.70286/ISU-11.02.2026>

Публікації, які додатково відображають наукові результати дисертації.

1. Г.І. Позднякова, О.І. Сігал, Д.Ю. Падерно. Теплопостачання міста Одеси. Монографія. Київ. Наукова думка. 2024. 224 стор. ISBN 978-966-00-1919-5

ABSTRACT

Pozdniakova G.I. Increasing the efficiency and reliability of centralized heating systems in municipal heat and power engineering. – Qualification work in the form of a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 144 – Heat and Power Engineering. – National University “Odesa Polytechnic”, Ministry of Education and Science of Ukraine, Odesa, 2026.

This dissertation is devoted to techniques of increasing the district heating systems heat generation facilities’ efficiency and reliability in the housing and communal sector, taking into account the main equipment operating modes, external climatic factors and the equipment extreme operating conditions. The proposed methods and recommendations can significantly increase the heat supply systems’ main and auxiliary equipment energy supply reliability, as well as improve the efficiency of using primary energy resources and reduce the impact on the environment.

The introduction substantiates this study relevance, defines the research purpose and sets the research tasks in accordance with the purpose identified, presents the obtained research result’s scientific novelty, and practical significance, exposes the dissertation study connection with research works and studies under international grants carried out at the National University "Odesa Polytechnic" in the field of techniques for increasing the heat supply systems efficiency and reliability.

The first chapter, “Modern trends on increasing the municipal sector heat supply systems efficiency and reliability” analyzes current trends in increasing the efficiency and reliability of heat supply systems both in Ukraine and worldwide, and shows the main ways to implement therein mentioned EU and Ukrainian regulations and directives on energy efficiency and green energy. This chapter main results include:

- the main ways to implement an energy saving program and improve energy technologies proposed based on the data obtained from the analysis of energy consumption;
- the main ways to increase the reliability of energy supply from the centralized heat supply systems of municipal facilities as identified;
- the prospects for the introduction of cogeneration units purposed for energy supply of municipal heat and power facilities are shown.

The second chapter, “Ways to increase the reliability of energy supply to heat generating enterprises,” presents the basic requirements for modern heat supply systems in view of their operational perspective, exposes research on ensuring the reliability of power supply for heat supply systems stable operation, and determining the probability of power supply failures in extreme operating conditions. This chapter main results are following:

- the most promising in terms of ensuring power supply is the backup due to the electricity generation system built into the heat generation system main circuit, i.e. full or partial cogeneration;
- for small heat supply systems, it is possible to use inexpensive autonomous electricity generators based on gasoline or diesel generators;
- the use of gas turbines to increase the power supply reliability is advisable for large power consumption capacities in the boiler room of a heat generating enterprise, in boiler rooms with medium-power water-heating boilers, or for independent power supply of the heat generating complex from smaller boiler rooms;
- when using gas turbines in the heat and electricity cogeneration system, it is advisable to use the low temperature units of up to 800 ° C creating the gas pressure of up to 0.8 MPa in front of the turbine, as they are characterized by high reliability, low cost and provide the greatest output of utilized heat;
- to assess the heat supply systems operation reliability based on analysis, it is advisable to choose the method of expert assessments.

In the third chapter "Improving the reliability of centralized heat supply sources through the use of cogeneration plants", an analysis of approaches to increasing the centralized heat supply systems reliability under conditions of power outages for a district heating boiler house using cogeneration and heat pump technologies has been carried out, schematic solutions on the use of cogeneration plants for the combined production of heat and electricity were proposed. This chapter main results include:

- a mathematical model of the energy supply system based on a gas-piston cogeneration plant and a model of the heat supply system main elements have been developed;

- a set of criteria for assessing the energy efficiency of centralized heat supply systems based on a district heating boiler house using cogeneration and heat pump technologies has been proposed;

- carried out is the analysis of input data was for modeling the load regimes of centralized heat supply systems with a cogeneration unit superstructure, which is based on a real project for the centralized heat supply system modernization in Odesa city.

In the fourth chapter "Results of research on the main measures to increase the reliability of heat supply systems energy supply", a study of the operation of cogeneration units at 6 boiler houses in Odesa city having been conducted, the main options for increasing the reliability of energy supply to the main consumers of electricity in boiler houses by reserving power supply sources are presented. This chapter main results include:

- due to the unevenness of the consumers' daily schedules of electrical and thermal load, the schedule filling factor has a satisfactory value at the level of 0.53–0.61;

- the cogeneration unit fuel consumption coefficient is lower than the nominal value by approximately 10%, which is a consequence of the unevenness of the daily load and incomplete use of the utilized heat;

- in order to increase the daily load filling factor, it is advisable to increase the cogeneration unit nominal power while simultaneously connecting to the cogeneration unit a larger number of different consumers whose daily load schedules differ and should overlap each other;

- comparative analysis of backup heat sources to increase the reliability of energy supply to boiler houses showed a certain advantage of cogeneration plants in terms of basic indicators.

Keywords: heat supply systems, district heating, heat generators, electricity, thermal energy, housing and communal services, reliability, energy efficiency, energy saving, cogeneration plants, heat pumps, energy supply, combined heat supply systems, combined energy supply, energy resources, expert assessments, solar systems, renewable energy sources, mathematical modeling.

LIST OF PUBLICATIONS OF THE ACQUIRER

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

1. Babaev, E. Pozdniakova, G. 2023. Analysis of the effectiveness of solar systems use in the university centralized heat supply systems. Proceedings of the Odessa Polytechnic University. No. 2(68) (2023). pp. 64-71.

<https://doi.org/10.15276/opu.2.68.2023.08>.

(Register of scientific professional publications of Ukraine, category "B").

2. Mazurenko, A., Klymchuk, O., Pozdniakova, G., Pustovit, A. i Shavrov, V. 2024. Problems of reliable heat supply providing in the conditions of non-guaranteed electricity supply to heat-generating enterprises. Proceedings of the Odessa Polytechnic University. No. 1(69) (2024). pp. 23-31.

<https://doi.org/10.15276/opu.1.69.2024.03>.

(Register of scientific professional publications of Ukraine, category "B").

3. 3. G.I. Pozdniakova, E.S. Babayev. Ways to increase the energy efficiency of heat supply of urban areas through comprehensive modernization of building engineering systems. Refrigeration Engineering and Technology. Volume 60 No. 1 (2024), 45-52.

<https://journals.ontu.edu.ua/index.php/reftech/article/view/2735/3156>

(Register of scientific professional publications of Ukraine, category "B").

4. Klymchuk, O. Pozdniakova, G. 2024. Improving the reliability of heat supply systems in the conditions of power outage. Proceedings of the Odessa Polytechnic University. No. 2(70) (2024). pp. 48-54.

<https://doi.org/10.15276/opu.2.70.2024.06>.

(Register of scientific professional publications of Ukraine, category "B").

5. Anton Mazurenko, Anton Panda, Oleksandr Klymchuk, Ganna Pozdniakova, Anatoliy Pustovit, Jan Valicek, Marta Harnicarova. Stability of systems in extreme operating conditions. Mm science journal i 2025 i november. P 8916-8920.

https://doi.org/10.17973/MMSJ.2025_11_2025037

(Register of international scientific metric publications Scopus).

Published works of approbation nature:

6. Luzhanska G.V. Babayev E.S. Sergeyev M.I. Pozdniakova G.I. Klymchuk I.O. Analysis of the current state of energy supply for municipal energy in the overall energy balance of the country. 9th International Scientific and Practical Conference THEORY AND PRACTICE OF SCIENCE: KEY ASPECTS ROME, ITALY February 19-20, 2024. p. 496-502.

<https://doi.org/10.51582/interconf.19-20.02.2024>

7. Klymchuk O. A., Pozdniakova G. I. MODERNIZATION OF HEATING NETWORKS IN THE POST-WAR PERIOD. PROBLEMS OF ECOLOGY AND OPERATION OF ENERGY FACILITIES. XXXIV International Conference “Problems of Ecology and Operation of Energy Facilities”. Collection of Proceedings. IVC ALKON. Kyiv 2024. pp.50-53.

https://ittf.kiev.ua/wp-content/uploads/2025/01/sbornik_2024_pp.pdf

8. Sigal O. I., Paderno D. Yu., Pozdniakova G. I. Measures to increase the efficiency of the heat sources of the centralized heat supply system of the city of odessa in the conditions of martial law. XXXIV International Conference “Problems of Ecology and Operation of Energy Facilities”. Collection of Proceedings. IVC ALKON. Kyiv 2024. pp.65-68.

https://ittf.kiev.ua/wp-content/uploads/2025/01/sbornik_2024_pp.pdf

9. Pozdniakova G.I. Improving the quality of operation of the heat supply system. 3rd International Scientific and Practical Conference «Modern Trends in the Development of Economy, Technology and Industry» Collection of Scientific Papers April 9-11, 2025 Toronto, Canada. pp. 307-311.

<https://doi.org/10.70286/ISU-09.04.2025>

10. Klymchuk O.A., Pozdnyakova G.I. Innovative technologies in combined heat supply systems. Abstracts of the reports of the XXIII INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND PRACTICAL CONFERENCE INFORMATION TECHNOLOGIES: SCIENCE,

ENGINEERING, TECHNOLOGY, EDUCATION, HEALTH MicroCAD-2025.
National University "Odesa Polytechnic", Odessa p. 760.

<https://ndch.kpi.kharkov.ua/wp-content/uploads/2025/06/Zbirnik-tez-2025.pdf>

11. Klymchuk O.A., Pozdnyakova G.I. Use of cogeneration plants for energy supply of heating systems. The materials of the conference 5th International Scientific and Practical Conference «Science And Information Technologies in The Modern World». Collection of Scientific Papers. February 11-13, 2026 Athens, Greece. pp. 420 – 422.

<https://doi.org/10.70286/ISU-11.02.2026>

Publications that further reflect the scientific results of the dissertation.

1. G.I. Pozdniakova, O.I. Sigal, D.Yu. Paderno. Heat supply of the city of Odessa. Monograph. Kyiv. Naukova Dumka. 2024. 224 pp. ISBN 978-966-00-1919-5

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	19
ВСТУП.....	20
РОЗДІЛ 1. СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТА НАДІЙНОСТІ В СИСТЕМАХ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ КОМУНАЛЬНОГО СЕКТОРУ.....	27
1.1 Комунальна теплоенергетика – сучасний стан та світовий досвід експлуатації систем теплопостачання.....	27
1.2 Шляхи підвищення енергоефективності систем теплозабезпечення об’єктів комунального господарства.....	31
1.3 Шляхи підвищення надійності енергозабезпечення систем теплопостачання житлово-комунального господарства.....	35
1.4 Впровадження в систему енергопостачання когенераційних установок	38
1.5 Висновки до розділу 1.....	44
РОЗДІЛ 2. ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ЕНЕРГОПОСТАЧАННЯ ТЕПЛОГЕНЕРУЮЧИХ ПІДПРИЄМСТВ.....	45
2.1 Основні вимоги до систем теплопостачання.....	45
2.1.1 Технічна досконалість систем.....	45
2.1.2 Ступінь екологічності систем.....	46
2.1.3 Економічна складова систем теплопостачання.....	47
2.1.4 Надійність систем теплопостачання.....	48
2.2 Забезпечення надійності електропостачання для стабільної роботи систем теплопостачання.....	50
2.2.1 Основні аспекти забезпечення надійності систем теплопостачання...	50
2.2. Системи резервування електропостачання основних елементів централізо-ваного теплопостачання.....	51
2.2.3 Системи забезпечення надійності енергопостачання на базі парового котла та парової турбіни.....	55
2.2.4 Системи забезпечення надійності енергопостачання на базі газотур-	

бінної установки (ГТУ).....	57
2.2.5 Основні техніко-економічні показники роботи ГТУ у системі безперебійного енергопостачання.....	61
2.3 Ймовірності відмов енергопостачання основних елементів систем централізованого теплопостачання в надзвичайних ситуаціях.....	65
2.3.1 Екстремальні умови експлуатації систем теплопостачання.....	65
2.3.2 Методи дослідження надійності елементів систем теплопостачання..	66
2.3.3 Визначення ймовірності відмов систем енергозабезпечення методом експертних оцінок.....	67
2.4 Висновки до розділу 2.....	70
РОЗДІЛ 3. ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ РОБОТИ ДЖЕРЕЛ ЦЕНТРАЛІЗОВАНОГО ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ ЗА РАХУНОК ЗАСТОСУВАННЯ КОГЕНЕРАЦІЙНИХ УСТАНОВОК.....	72
3.1 Застосування когенераційних установок в системах централізованого теплопостачання.....	72
3.2 Моделювання елементів системи теплопостачання та показники ефективності системи.....	77
3.2.1 Модель газопоршневого двигуна-генератора.....	77
3.2.2 Моделювання роботи котла-утилізатора	81
3.2.3 Моделювання роботи теплового насоса.....	83
3.2.4 Показники ефективності систем централізованого теплопостачання з надбудовою котла-утилізатора.....	86
3.3 Узгодження графіків електричного і теплового навантаження комбінованої системи енергозабезпечення.....	89
3.3.1 Узгодження графіків електричного і теплового навантаження КСЕ при автономній роботі КУ.....	89
3.3.2 Узгодження графіків електричного і теплового навантаження КСЕ при синхронізації КУ з енергомережою.....	91
3.4 Результати моделювання режимів навантаження систем централізованого теплопостачання з надбудовою КУ.....	91

3.4.1 Вхідні дані щодо моделювання КСЕ.....	91
3.4.2 Результати моделювання режимів навантаження систем теплопостачання з надбудовою КУ.....	95
3.5 Висновки до розділу 3.....	101
РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ОСНОВНИХ ЗАХОДІВ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ.....	
4.1 Шляхи підвищення надійності енергозабезпечення систем теплопостачання.....	103
4.2 Дослідження експлуатаційних показників когенераційних установок.....	106
4.2.1 Передумови широкого впровадження когенераційних установок в системах централізованого теплопостачання.....	106
4.2.2 Основні данні КУ, що були використанні під час дослідження.....	107
4.2.3 Результати досліджень роботи КУ.....	114
4.2.4 Техніко-економічні показники роботи когенераційній установи у складі комплексу енергозабезпечення систем централізованого теплопостачання.....	116
4.3 Підвищення надійності енергозабезпечення систем теплопостачання за рахунок використання сонячної електростанції.....	118
4.3.1 Сучасний стан використання сонячної енергії для забезпечення автономності електроспоживання.....	118
4.3.2 Основні фактори, що впливають на ефективність роботи СЕС.....	119
4.3.3 Склад сучасних СЕС.....	120
4.3.4 Методика розрахунку СЕС.....	122
4.3.5 Результати моделювання роботи СЕС для окремої опалювальної котельні.....	123
4.4 Порівняльний аналіз застосування різних заходів підвищення надійності опалювальної котельні.....	128
4.5 Висновки до розділу 4.....	130
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ.....	132

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	135
ДОДАТОК А.....	148
ДОДАТОК Б.....	151
ДОДАТОК В.....	152
ДОДАТОК Г.....	153
ДОДАТОК Д.....	154

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ВК – водогрійний котел;

ГДГ – газопоршневий двигун-генератор;

КВП – коефіцієнта використання теплоти палива;

ККД – коефіцієнт корисної дії;

КСЕ – комбіновані системи енергозабезпечення;

КУ – когенераційна установка;

НПД – низькопотенційного джерела тепла;

ТЕС – теплова електрична станція;

ТН – тепловий насос;

СОР – коефіцієнту перетворення теплового насосу.

ЖКГ – житлово-комунальне господарство

ОЕС -об'єднана енергосистема

ВДЕ – відновлювальні джерела енергії

ПТ – парова турбіна

АВР - автоматичне ввімкнення резерву

СЕС – сонячні електростанції

ВСТУП

Актуальність теми. Формування ефективної політики підвищення енергоефективності в теплоенергетичній галузі базується на чинних нормативно-правових документах та стратегіях розвитку енергетики як в Україні [1, 2], так і в Європейському Союзі [3, 4]. Також суттєвим фактором розвитку енергоефективності в енергетичному секторі економіки є гармонізація провідних міжнародних стандартів з чинними національними стандартами, які регламентують вимоги до ефективності роботи теплоенергетичного комплексу, в тому числі і в житлово-комунальному господарстві [5]. Нормативно-правове забезпечення є одним із ключових механізмів реалізації державної та регіональної енергетичної політики, спрямованої на раціональне використання паливно-енергетичних ресурсів та забезпечення сталого розвитку енергетичного сектору.

Підвищення енергоефективності в енергетичній галузі в першу чергу залежить від процесу удосконалення технологічної структури, до складу якої належать основні енергогенеруючі установки, інженерні мережі та допоміжні системи. Водночас важливою умовою досягнення високих показників енергоефективності є реалізація відповідних заходів у межах чітко структурованих організаційно-технологічних систем із визначеними функціями управління та контролю [6].

На ряду з тенденціями, спрямованими на підвищення енергоефективності, в останні часи також набирають обертів питання надійності енергопостачання об'єктів, що відносяться до критичної інфраструктури забезпечення життєдіяльності як промислового, так і житлово-комунального сектору економіки України [7]. Отриманий за останні роки досвід роки показав вразливі сторони енергокомплексу країни та дав змогу намітити шляхи вирішення важливих завдань забезпечення надійності енергопостачання. Необхідно надалі переходити від локальних вирішень проблем до системного підходу та розробки стратегій енергонезалежності й надійності в енергетичній галузі.

Забезпечення безперебійного теплопостачання житлових, громадських і промислових об'єктів упродовж опалювального періоду є одним із пріоритетних

завдань функціонування систем теплопостачання, особливо в умовах надзвичайних ситуацій та воєнного стану. За таких обставин суттєво зростають ризики пошкодження джерел генерації теплової енергії, об'єктів енергетичної інфраструктури та елементів теплових мереж. У зв'язку з цим особливого значення набувають питання оцінки надійності систем теплопостачання, аналізу ймовірності виникнення відмов та обґрунтування необхідності резервування основного та допоміжного обладнання.

Рівень надійності систем теплопостачання визначається технічним станом джерел теплової енергії, теплогенеруючого та допоміжного обладнання, теплових мереж, а також ефективністю функціонування систем управління, автоматизації та контролю. До основних чинників, що впливають на надійність роботи системи, належать: ступінь резервування критично важливих елементів, наявність автономних або аварійних джерел енергопостачання, своєчасне проведення технічного обслуговування, ремонтних робіт та модернізація обладнання.

Зниження рівня надійності енергопостачання може призвести до порушення режимів теплопостачання, погіршення якісних показників теплоносія, економічних втрат та негативних соціальних наслідків. Особливої актуальності проблема набуває в осінньо-зимовий період, коли безперервність подачі теплової енергії є необхідною умовою забезпечення нормативних параметрів мікроклімату в будівлях різного призначення та підтримання належних умов життєдіяльності населення.

Підвищення надійності енергозабезпечення систем теплопостачання досягається шляхом реалізації комплексу технічних та організаційних заходів, спрямованих на підвищення рівня енергетичної безпеки та експлуатаційної стійкості систем. До таких заходів належать: впровадження сучасних енергоефективних технологій, автоматизованих систем моніторингу та диспетчерського управління, використання резервних джерел теплової й електричної енергії, а також оптимізація режимів роботи обладнання.

Одним із найбільш перспективних напрямів підвищення ефективності та надійності функціонування систем теплопостачання є впровадження когенерацій-

них установок, принцип роботи яких ґрунтується на комбінованому виробництві теплової та електричної енергії в межах єдиного технологічного процесу [8]. Застосування когенераційних технологій забезпечує більш повне використання енергетичного потенціалу палива, що сприяє суттєвому підвищенню загальної ефективності використання паливно-енергетичних ресурсів. Крім того, інтеграція когенераційних установок до систем теплопостачання дозволяє знизити рівень залежності теплогенеруючих об'єктів від зовнішніх джерел електропостачання, підвищуючи їхню енергетичну автономність, експлуатаційну стійкість та надійність функціонування в умовах нестабільного енергозабезпечення [9].

Вказані обставини показують актуальність наукових досліджень спрямованих на підвищення енергоефективності та надійності систем енергозабезпечення як промисловості, так і об'єктів житлово - комунального сектору, насамперед тих, що відносяться до критичної інфраструктури.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота виконана відповідно до планів, затверджених Міністерством освіти і науки України, які виконано в Національному університеті «Одеська політехніка» і є складовою частиною НДР № 179-41 за темою «Забезпечення ефективного функціонування систем теплопостачання будівель громадського призначення теоретико-методологічні та практичні аспекти» (№ 0119U003518); НДР № 266-41 за темою "Підвищення надійності систем теплопостачання об'єктів критичної інфраструктури." (№ 0125U003952); міжнародним грантовим проєктом № DRP0401077 «Впровадження Зеленої Економіки для комунальних систем опалення шляхом інтеграції відновлюваних джерел енергії (Greening Communal Heating Systems by Integrating Renewables)» в рамках міжнародної програми «INTERREG DANUBE REGION SMF» сумісно с партнерами «Інститутом інтелектуальних технологій Кемпелен; KInIT; (Kempelen Institute of Intelligent Technologies); Братислава, Словаччина; компанія ZSE Енергія; ZSE E; ZSE Energia; Братислава, Словаччина.

Мета й завдання дослідження.

Метою дисертаційної роботи є підвищення надійності та ефективності систем теплопостачання об'єктів житлово-комунального сектору міст та селищ за рахунок використання когенераційних технологій шляхом удосконалення режимів роботи генераторів теплоти з надбудовою теплових двигунів в умовах можливих відключеннях енергопостачання.

Для досягнення цієї мети необхідно вирішити наступні задачі:

- виконати аналіз шляхів та методів покращення показників енергетичної ефективності та надійності об'єктів генерації теплоти в системах централізованого теплопостачання житлово-комунального сектору;
- розробити схемно-конструктивні рішення підвищення енергетичної ефективності та надійності джерел теплоти в системах централізованого теплопостачання для удосконалення режимів роботи систем теплозабезпечення споживачів житлово-комунального сектору за рахунок реалізації раціональних режимів роботи системи на засадах енергозберігаючих технологій;
- виконати моделювання процесів в елементах системи забезпечення надійності роботи джерел теплоти в системах централізованого теплопостачання споживачів житлово-комунального сектору на основі застосування когенераційних установок;
- провести дослідження роботи діючих когенераційних установок на об'єктах генерації теплоти централізованого теплопостачання споживачів житлово-комунального сектору для визначення раціональних режимів їх роботи, а також ефективності використання когенераційних технологій та відновлювальних джерел енергії;

Об'єкт дослідження – системи теплопостачання житлово-комунального сектору з надбудовою теплових двигунів, які забезпечують високі енергоекологічні та режимні показники на засадах енергозберігаючих технологій.

Предмет дослідження – теплові процеси та режими роботи в елементах систем теплопостачання житлово-комунального сектору з раціональним використанням надбудови теплових двигунів малої потужності.

Методи дослідження. При вирішенні поставлених завдань дослідження були використані методи математичного моделювання, ймовірнісні підходи до аналізу надійності роботи систем, методи структурного і функціонального аналізу

технічних систем, а також експериментальні методи дослідження, спеціалізовані програмні комплекси для аналізу отриманих даних, для вдосконалення схемних рішень та енергетичних режимних параметрів об'єкта дослідження.

Наукова новизна одержаних результатів.

У дисертаційній роботі отримано нові науково обґрунтовані результати щодо підвищення надійності та ефективності роботи систем теплозабезпечення об'єктів житлово-комунального сектору.

1. Подальшого розвитку отримали методи оцінки надійності енергозабезпечення об'єктів генерації теплоти;
2. Подальшого розвитку отримали схемні рішення енергозабезпечення котельні на базі когенераційних технологій та відновлювальних джерел енергії, досліджено ефективність їх роботи;
3. Вдосконалено математичну модель системи енергозабезпечення на базі газо-поршневої когенераційної установки та моделі основних елементів системи теплопостачання;
4. Вперше запропоновано комплексний підхід щодо оцінки енергетичної ефективності та надійності роботи систем централізованого теплопостачання з використанням когенераційних технологій та відновлювальних джерел енергії.

Практичне значення одержаних результатів. На основі розроблених та реалізованих математичних моделей, а також результатів досліджень на діючих об'єктах генерації теплоти запропоновано рекомендації щодо впровадження у системи енергозабезпечення централізованого теплопостачання резервних джерел енергопостачання на базі когенераційних установок та сонячних електростанцій.

Основні положення дисертаційного дослідження впроваджено:

– у КП теплових мереж «Тернопільміськтеплокомуненерго». Розроблені схемні рішення на основі впровадження когенераційних установок в системи централізованого теплопостачання з можливістю перенаправлення енергетичних потоків в залежності від актуальних потреб дозволяють підвищити надійність енергопостачання джерел теплоти, а також привести до зменшення експлуатаційних витрат на енергопостачання підприємства;

- У КП «Житомиртеплокомуненерго». Отримані результати дисертаційного дослідження дозволили підвищити як стійкість електропостачання систем централізованого теплопостачання так і зменшити витрати на первинні енергоресурси підприємства.

— в навчальний процес підготовки бакалаврів та магістрів за освітньо-професійними програмами «Теплоенергетика та менеджмент енергозбереження» та «Теплові електричні станції та інноваційні енергетичні технології» та освітньо-науковою програмою «Теплоенергетика» на кафедрі теплових електростанцій та енергозберігаючих технологій Національного університету «Одеська політехніка» в курсах: «Теплопостачання підприємств», «Технічні системи та обладнання галузі», «Надійність експлуатації та безпека енергопідприємств».

Особистий внесок здобувача. Всі наукові результати, які викладені в дисертаційній роботі, автором отримано самостійно. Автором проведено дослідження щодо забезпечення надійності електропостачання для стабільної роботи систем теплопостачання в екстремальних умовах експлуатації; запропоновано математичну модель системи енергозабезпечення на базі когенераційної установки та моделі основних елементів системи теплопостачання; виконано аналіз вхідних даних щодо моделювання режимів навантаження систем централізованого теплопостачання з надбудовою КУ; проведено дослідження роботи когенераційних установок на 6 котельнях м. Одеса, наведено основні варіанти підвищення надійності енергопостачання основних споживачів електроенергії котелень за рахунок резервування джерел електроживлення.

У роботах, опублікованих у співавторстві, здобувачеві належать: аналіз результатів моделювання роботи геліосистеми на споруді громадського призначення [1]; аналіз сучасного стану централізованих систем теплопостачання, рекомендації щодо використання в системі теплозабезпечення резервування електропостачання за рахунок когенераційних технологій [2]; аналіз результатів моделювання впровадження різних видів термомодернізації [3]; проведено аналіз застосування когенераційних установок в системах енергозабезпечення комплексів комунального господарства, розроблено схему інтеграції когенераційної установки в централізовану систему теплозабезпечення, проведено аналіз енергетичної ефективності запропонованих рішень підвищення надійності енергозабезпечення систем теплопостачання [4]; проведено аналіз основних факторів, що впливають на стійкість систем централізованого теплопостачання в екстремальних умовах, запропоновано схему котельні з резервним електрогенератором в режимі когенерації та забезпеченням живучості системи за рахунок електропідігріву мережевої води [5]; проведено аналіз сучасного стану теплових мереж [6]; запропоновано шляхи модернізації теплових мереж в м. Одеса [7]; представлені перспективи впровадження когенераційних технологій в системи теплопостачання м. Одеса

[8]; проведено порівняльний розрахунок експлуатаційних витрат при застосування різних режимів системи теплопостачання [10]; запропоновано теплову схему комбінованої системи енергозабезпечення котельні з тепловим насосом та когенераційною установкою, проведено аналіз роботи представленої схеми [11].

Апробація результатів роботи.

Результати проведеного дисертаційного дослідження були представлені та обговорені на наступних конференціях: 9th International Scientific and Practical Conference THEORY AND PRACTICE OF SCIENCE: KEY ASPECTS ROME, ITALY February 19-20, 2024; XXXIV міжнародна конференція “Проблеми екології і експлуатації об’єктів енергетики” м. Київ 2024 року; 3rd International Scientific and Practical Conference «Modern Trends in the Development of Economy, Technology and Industry» Collection of Scientific Papers April 9-11, 2025 Toronto, Canada; XXXIII МІЖНАРОДНОЇ НАУКОВО-ПРАКТИЧНОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ: НАУКА, ТЕХНІКА, ТЕХНОЛОГІЯ, ОСВІТА, ЗДОРОВ’Я MicroCAD - 2025, м. Одеса 2025 рік; conference 5th International Scientific and Practical Conference «Science And Information Technologies in The Modern World». February 11-13, 2026 Athens, Greece

Публікації. Результати наукових досліджень представлено в 11 друкованих працях, з них 5 – у фахових виданнях (одна з яких включена до міжнародної наукометричної бази Scopus), а також 6 – тези доповідей на міжнародних конференціях, додатково опублікована 1 монографія.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, основного змісту, що включає в себе 4 розділи, висновків, списку використаної літератури з 110 найменування та додатків А, Б, В, Г. Загальний обсяг роботи становить 154 сторінки (з них 147– основного тексту). В роботу входять також 38 рисунків і 12 таблиць.

РОЗДІЛ 1. СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТА НАДІЙНОСТІ В СИСТЕМАХ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ КОМУНАЛЬНОГО СЕКТОРУ

1.1 Комунальна теплоенергетика – сучасний стан та світовий досвід експлуатації систем теплопостачання

Скорочення споживання первинних енергетичних ресурсів та мінімізація негативного впливу енергетичного сектору на навколишнє середовище на сучасному етапі розвитку світової енергетики набули характеру системної державної політики. Вказані пріоритети закріплені у відповідних законодавчих актах, міжнародних директивах та національних енергетичних стратегіях як у провідних країнах світу [4, 10–12], так і в Україні [13, 14]. У межах реалізації зазначених стратегічних документів урядами країн Європейського Союзу та України систематично проводяться міждержавні та національні заходи, спрямовані на координацію енергетичної політики, а також визначаються середньо- та довгострокові цілі щодо зниження енергоємності економік і підвищення ефективності використання енергоресурсів [15, 16].

Одним із ключових споживачів первинних енергетичних ресурсів є житлово-комунальний сектор, який охоплює не лише житловий фонд, але й інженерну та соціальну інфраструктуру міст і населених пунктів [17, 18]. Його функціонування забезпечує базові умови життєдіяльності населення та стабільність роботи суміжних галузей економіки.

Система житлово-комунального господарства (ЖКГ) являє собою складну організаційно-технічну та економічну систему, що включає виробників і споживачів житлово-комунальних послуг [19]. Формування попиту на зазначені послуги визначається необхідністю забезпечення нормативних санітарно-гігієнічних та безпечних умов проживання населення, а також залежить від рівня тарифів і платоспроможності споживачів. У загальному вигляді ЖКГ представляє сукупність підприємств і служб, що здійснюють обслуговування житлового фонду міст, се-

лищ і сільських населених пунктів та входять до структури відповідних регіональних господарських систем.

У багатьох населених пунктах підприємства комунального сектору також забезпечують потреби промислових підприємств у водопостачанні, електропостачанні та газопостачанні. У свою чергу, великі промислові споживачі можуть функціонувати як із підключенням до централізованих систем, так і з використанням власних локальних систем теплозабезпечення, водопостачання та водовідведення [20].

ЖКГ країни (довоєнна ситуація) характеризується розгалуженою інфраструктурою. Житловий фонд становить близько 10 млн будинків загальною площею 1 000 млн м², з яких у комунальній власності перебуває близько 240 тис. будинків із загальною площею понад 65 млн м². Окрему проблему становить наявність 60 тис. старих та аварійних будівель загальною площею понад 5 млн м², у яких проживає близько 140 тис. осіб. Житловий фонд масової забудови 1960–1970-х років становить близько 70 млн м² і потребує комплексної реконструкції або заміни [19]. Низький рівень енергоефективності зазначеного фонду, а також високий ступінь фізичного та морального зносу обумовлюють необхідність впровадження сучасних енергозберігаючих технологій, матеріалів і технічних рішень при проведенні капітальних ремонтів та реконструкції.

Фонд теплоенергетичної інфраструктури України представлений близько 8000 підприємствами різних форм власності, на яких експлуатується понад 30 000 котелень сумарною встановленою потужністю понад 130 000 Гкал/год. Загальна кількість котлоагрегатів становить близько 72 000 одиниць, з яких майже 16 000 експлуатуються понад 20 років [21]. Така структура свідчить про значну частку морально та фізично застарілого обладнання, що безпосередньо впливає на ефективність і надійність систем теплопостачання.

Загальна протяжність двотрубних теплових мереж і становить майже 36 000 км, з яких понад 5 500 км перебувають у зношеному або аварійному стані. Річні втрати теплової енергії в інженерних мережах сягають майже 13 % від загального обсягу реалізованої теплоти [19]. Подібний рівень втрат свідчить про не-

достатню ефективність транспортування теплової енергії та необхідність модернізації теплових мереж.

Житлово-комунальний сектор України є одним із найбільших споживачів енергоресурсів, на який припадає майже 45 % загального енергоспоживання країни, або близько 70 млн т у.п., що становить приблизно 30 % загального споживання палива в Україні. При цьому житловий фонд і соціальна сфера споживають близько 85 % енергоресурсів, що використовуються галуззю.

Щорічне споживання енергоресурсів у секторі ЖКГ становить близько 10,0 млрд кВт·год електроенергії, близько 14,0 млрд м³ природного газу та приблизно 1,5 млн т вугілля. Частка нетрадиційних та відновлюваних джерел енергії залишається незначною і становить близько 0,87 млн т у.п. [22].

Однією з ключових проблем галузі є високий рівень нераціонального використання паливно-енергетичних ресурсів. Річні втрати теплової енергії перевищують 13 млн Гкал, що становить близько 11 % від загального обсягу відпущеної теплоти, а також супроводжуються непродуктивними витратами понад 2 млрд м³ природного газу. Основною причиною такої ситуації є незадовільний технічний стан об'єктів ЖКГ, ступінь зносу основних фондів яких перевищує 50 %.

За оцінками експертів, впровадження енергозберігаючих заходів у житлово-комунальному секторі дозволяє досягти суттєвого скорочення споживання енергоресурсів, зокрема:

- природного газу на етапах виробництва, транспортування та постачання теплової енергії в середньому на 22 %;
- електроенергії у системах водопостачання та водовідведення на 15–20 %.

Втрати та необліковані обсяги питної води у водопровідно-каналізаційному господарстві міст України перевищують 30 %, а в окремих випадках досягають 60 %. Крім того, через неефективні режими роботи насосних станцій та зношеність мереж втрачається до чверті споживаної електроенергії [19].

Окремо слід відзначити, що лише в сегменті опалення житлових будинків масової забудови щорічні втрати природного газу перевищують 600 млн м³, а не-

раціональне використання електроенергії у водопровідно-каналізаційному господарстві сягає близько 2 млрд кВт·год.

Аналіз функціонування систем централізованого теплопостачання свідчить, що сукупні втрати енергоресурсів розподіляються наступним чином: на етапі виробництва теплової енергії (котельні) – до 22 %, під час транспортування – до 25 %, а найбільша частка втрат припадає на стадію кінцевого споживання – до 30 %. Така структура втрат визначає пріоритетність заходів з енергоефективності саме на всіх етапах життєвого циклу теплової енергії.

Водночас сучасні технологічні рішення дозволяють знизити сумарні втрати природного газу в системах теплопостачання в середньому на 22 %, що підтверджує значний потенціал підвищення ефективності галузі.

Слід також відзначити, що ЖКГ України залишається єдиним великим сектором національної економіки, який не демонструє стійкої тенденції до зниження загального енергоспоживання у XXI столітті. При цьому енергоемність виробництва та надання комунальних послуг перевищує відповідні показники розвинених країн більш ніж у 1,5 рази [19].

Енергетичні витрати на одного мешканця в Україні становлять 0,7–1,0 т.у.п., тоді як у країнах Європи цей показник є суттєво нижчим. У перерахунку на 1 м² площі житлового фонду з централізованим теплопостачанням в Україні споживається близько 1,4 т.у.п. на рік, що перевищує аналогічні показники США у 1,5 рази та Швеції у 2,5 – 3 рази.

Енергоемність валового внутрішнього продукту України становить близько 0,89 кг у.п./дол., тоді як у розвинених країнах Європи цей показник у середньому утричі нижчий (зокрема, у Німеччині – 0,26 кг у.п./дол.) [20, 23].

Питома витрата палива на виробництво 1 Гкал теплової енергії в комунальній теплоенергетиці України становить 160 – 180 кг.у.п., тоді як у розвинених країнах – 145–150 кг у.п. Це зумовлює підвищені викиди забруднюючих речовин в атмосферу, зокрема оксиду вуглецю, на рівні 45 г/МДж проти 26 г/МДж у країнах із більш ефективними технологіями. Починаючи з 2012 року, в Україні, як і в кра-

їнах Європейського Союзу, активно впроваджуються програми енергозберігаючої санації житлових будівель [24].

1.2 Шляхи підвищення енергоефективності систем теплозабезпечення об'єктів комунального господарства

Формування ефективної політики енергозбереження та підвищення енергоефективності систем теплозабезпечення в сучасних умовах базується на нормативно-правовій базі у сфері енергетики, а також на узгоджених міжнародних і національних стандартах, що регламентують показники енергетичної ефективності та екологічної безпеки [1, 25, 26]. Саме нормативне середовище виступає ключовим інструментом забезпечення системного підходу до реалізації енергетичної політики на рівні держави та муніципальних утворень.

Реалізація програм енергозбереження в системах теплозабезпечення потребує комплексного поетапного підходу, який включає такі основні елементи [27]:

- проведення попереднього техніко-економічного аналізу на основі достовірних даних про фактичне енергоспоживання, тарифну політику, рівень платіжної дисципліни та економічну доцільність заходів;
- формування переліку пріоритетних заходів, спрямованих на оптимізацію структури та режимів енергоспоживання;
- прийняття управлінських рішень щодо впровадження визначених енергозберігаючих заходів;
- впровадження систем енергетичного менеджменту та оптимізація режимів роботи енергетичного обладнання;
- здійснення регулярного моніторингу результативності впроваджених заходів та інформування зацікавлених сторін щодо досягнутих показників енергоефективності.

Підвищення енергоефективності в енергетичному секторі безпосередньо пов'язане з удосконаленням технологічної структури енергетичного комплексу, до складу якого входять основні групи обладнання та інженерних систем [28]:

- теплогенеруючі установки (теплові електростанції, теплоелектроцентралі, котельні різного призначення, котлоагрегати, промислові печі);
- системи транспортування та розподілу теплової енергії (теплові мережі, теплові пункти, розподільчі вузли);
- теплоізоляційні системи будівель, трубопроводів, резервуарів і теплообмінного обладнання;
- системи вентиляції та кондиціонування повітря будівель різного функціонального призначення;
- обладнання для генерації електричної енергії (електростанції, турбомашини, допоміжні енергетичні установки);
- системи електропостачання та розподілу електричної енергії;
- електротехнічні установки, прилади керування та автоматизації енергоспоживання.

Стратегічні напрями державної енергетичної політики, спрямовані на підвищення енергоефективності та енергетичної безпеки, включають [2]:

- забезпечення надійного та безперебійного енергопостачання;
- підвищення загального рівня енергоефективності та реалізацію потенціалу енергозбереження;
- модернізацію та реконструкцію енергетичної інфраструктури;
- підвищення рівня технічної та екологічної безпеки енергетичних об'єктів;
- формування конкурентного та лібералізованого ринку енергоносіїв;
- структурну трансформацію енергетичного комплексу;
- збільшення частки власних енергоресурсів та розвиток місцевих і альтернативних джерел енергії;
- впровадження екологічно чистих технологій генерації енергії;
- реформування енергетичного сектору відповідно до принципів ринкової економіки;
- залучення інвестиційних ресурсів у розвиток паливно-енергетичного комплексу;
- диверсифікацію джерел постачання енергоресурсів;

– гармонізацію енергетичних стандартів із нормами Європейського Союзу.

Загальна ефективність використання енергії визначається рівнем оптимізації процесів її виробництва, транспортування та споживання [29]. При цьому важливо, щоб заходи з підвищення енергоефективності були структуровані в межах чітко визначених організаційно-технологічних систем із встановленими межами відповідальності та контролю [24, 30].

Світовий досвід свідчить про те, що провідні країни Європи приділяють значну увагу розвитку відновлюваних та альтернативних джерел енергії як ключовому елементу підвищення енергетичної незалежності та зниження вуглецевих викидів [31]. Зокрема, у країнах Європейського Союзу передбачалося досягнення до 2020 року частки енергії з відновлюваних джерел у загальному енергобалансі на рівні близько 20 %.

Структурні зміни у виробництві електричної енергії в Україні наведено в таблиці 1.1. [32], що дозволяє оцінити динаміку генерації та частку окремих типів джерел енергії в ОЕС України [23].

Таблиця 1.1 Структура виробництва електроенергії в ОЕС України за січень-вересень 2020-21 рр

Виробники е/е	9 міс-2020 р.		9 міс-2021 р.		Зміна	
	млн кВт-год	частка загального виробництва %	млн кВт-год	частка загального виробництва %	млн кВт-год	%
АЕС	56 771,1	52,7	61 945,7	54,2	5 174,6	9,1
ГК ТЕС	26 117,8	24,3	26 732,3	23,4	614,5	2,4
ТЕЦ и КУ	8 911,7	8,3	6 575,2	5,7	-2 336,5	-26,2
ГЕС	4 434,4	4,1	7 239,5	6,3	2 805,1	63,3
ГАЕС	1 162,2	1,1	899,3	0,8	-262,9	-22,6
Блок-станції	1 421,3	1,3	1 240,0	1,1	-181,3	-12,8
Альтерн. джерела (ВЕС, ЕС, біомаса)	8 855,0	8,2	9 743,4	8,5	888,4	10,0
ВСЬОГО	107 673,5	100,0	114 375,4	100,0	6 701,9	6,2

Аналіз наведених даних свідчить про домінування традиційних джерел генерації, зокрема атомної та теплової енергетики, при поступовому, але недостатньо швидкому зростанні частки відновлюваних джерел енергії [33].

Перспективні напрями розвитку відновлюваної енергетики в Україні до 2030 року наведено в таблиці 1.2 [34], яка характеризує структуру та динаміку розвитку основних технологій генерації з використанням ВДЕ.

Таблиця 1.2 Перспективні напрями та рівні освоєння енергії відновлюваних джерел в Україні до 2030 року.

Показники	Виробництво теплової та електричної енергії з ВДЕ у 2020 -2030 роках			
	2020		2030	
	млн т у.п.	%	млн т у.п.	%
Вітроенергетика	1,00	6,97	2,15	9,95
Фотоелектрика	0,01	0,07	0,03	0,14
Мала гідроенергетика	0,48	3,36	0,65	3,01
Велика гідроенергетика	5,6	39,06	6,53	30,23
Сонячні теплові колектори	0,7	4,88	1,28	5,93
Біоенергетика	6,3	43,93	10,13	46,9
Геотермальна енергетика	0,247	1,73	0,83	3,84
ВСЬОГО	14,34	100	21,6	100

Отримані прогнозні дані свідчать про поступове збільшення внеску відновлюваних джерел енергії в загальний енергетичний баланс України, однак їх частка залишається обмеженою порівняно з потенційними можливостями галузі.

З метою підвищення економічної привабливості впровадження відновлюваних джерел енергії у багатьох країнах реалізуються державні механізми стимулювання, зокрема системи субсидування інвестицій у відповідне обладнання. Так, у ряді випадків держава компенсує до 30 % вартості установок вітроенергетики або сонячної теплової генерації. Одночасно запроваджуються системи сертифікації та технічної оцінки енергетичного обладнання, що передбачають видачу технічних

паспортів та диференційовану систему підтримки залежно від ефективності установки. Такий підхід дозволяє одночасно стимулювати розвиток ринку та витіснити неефективні технологічні рішення, використовуючи економічні механізми державного регулювання.

1.3 Шляхи підвищення надійності енергозабезпечення систем теплопостачання житлово-комунального господарства

Сучасний стан комунальної теплоенергетики характеризується значною складністю функціонування та необхідністю забезпечення стабільного теплопостачання широкого кола споживачів, включаючи житлові масиви, об'єкти соціальної сфери та критично важливої інфраструктури. Водночас системи теплопостачання потребують стабільного електрозабезпечення для роботи основного технологічного обладнання – насосних агрегатів, котельних установок, систем автоматизації та диспетчерського керування [35].

В умовах підвищеної нестабільності енергетичних систем актуалізується потреба у впровадженні децентралізованих джерел електричної енергії, здатних забезпечувати автономне або резервне живлення об'єктів централізованого теплопостачання [36]. Питання підвищення енергоефективності та надійності енергетичних систем активно досліджуються та впроваджуються як у країнах Європейського Союзу, так і в інших регіонах світу [37].

Безперебійне теплопостачання житлових і промислових об'єктів у зимовий період є критично важливим навіть за умов надзвичайних ситуацій та воєнного стану. При цьому необхідно враховувати підвищені ризики пошкодження як джерел генерації теплової енергії, так і елементів теплових мереж. У таких умовах особливого значення набуває оцінювання надійності систем, аналіз імовірності відмов, а також обґрунтування доцільності резервування основних та допоміжних елементів інфраструктури.

Надійність енергопостачання систем теплопостачання є одним із ключових чинників забезпечення стабільного функціонування житлово-комунального господарства, промислових підприємств та об'єктів соціальної інфраструктури. Вона

характеризується здатністю системи безперервно та у необхідному обсязі забезпечувати споживачів тепловою енергією відповідно до встановлених параметрів якості та безпеки.

Рівень надійності систем теплопостачання залежить від технічного стану джерел теплової енергії, енергетичного обладнання, теплових мереж, а також ефективності систем управління та контролю. Важливими факторами є ступінь резервування основного обладнання, наявність аварійних джерел енергопостачання, своєчасне проведення ремонтно-профілактичних робіт і модернізація застарілих елементів системи.

Порушення надійності енергопостачання може призводити до перебоїв у подачі теплової енергії, зниження температурних параметрів теплоносія, економічних збитків та погіршення умов життєдіяльності населення. Особливо важливе значення забезпечення надійності набуває в осінньо-зимовий період, коли безперервність теплопостачання є необхідною умовою нормального функціонування будівель і споруд.

Підвищення надійності систем теплопостачання досягається шляхом впровадження сучасних енергозберігаючих технологій, автоматизованих систем диспетчерського управління, використання резервних джерел енергії та оптимізації режимів роботи обладнання. Значну роль також відіграє розвиток децентралізованих систем теплопостачання та інтеграція відновлюваних джерел енергії, що сприяє зниженню ризиків аварійних відключень і підвищенню енергетичної безпеки.

На практиці для підвищення надійності електрозабезпечення застосовуються різні технічні рішення, серед яких поширеним є використання дизель-генераторних установок [38]. Водночас зазначений підхід має суттєві обмеження, пов'язані з необхідністю забезпечення запасів палива та логістичними витратами. Альтернативним рішенням є застосування газових генераторів, інтегрованих у газові мережі об'єктів теплопостачання, що забезпечує більш високу ефективність та екологічну доцільність [39, 40].

У сучасних умовах постає завдання комплексного підходу до забезпечення надійності енергопостачання об'єктів житлово-комунального господарства як тепловою, так і електричною енергією [41, 42]. Це потребує раціонального розміщення генеруючих потужностей, а також узгодження режимів виробництва та споживання різних видів енергоресурсів [43].

Одним із перспективних напрямів вирішення зазначених завдань є впровадження когенераційних установок, які забезпечують одночасне виробництво теплової та електричної енергії в межах єдиного технологічного циклу. Когенераційний підхід дозволяє суттєво підвищити ефективність використання паливно-енергетичних ресурсів та зменшити залежність об'єктів теплопостачання від зовнішніх джерел електропостачання.

Застосування когенераційних установок є одним із перспективних напрямів підвищення надійності роботи опалювальних котелень та ефективності систем теплопостачання [44]. Когенерація передбачає одночасне виробництво електричної та теплової енергії в межах єдиного технологічного процесу, що забезпечує більш раціональне використання паливно-енергетичних ресурсів.

Використання когенераційних установок на опалювальних котельнях дозволяє підвищити рівень енергетичної незалежності об'єктів теплопостачання за рахунок власного виробництва електроенергії. Це особливо важливо в умовах нестабільного електропостачання або аварійних відключень електроенергії, коли забезпечення безперебійної роботи насосного обладнання, систем автоматики та допоміжних механізмів є критично необхідним для підтримання стабільного теплопостачання споживачів [45].

Однією з основних переваг когенераційних установок є високий коефіцієнт корисного використання палива, який може досягати 80 – 90 %. На відміну від традиційного роздільного виробництва теплової та електричної енергії, у когенераційних системах теплота відпрацьованих газів і охолоджувальних систем додатково використовується для потреб теплопостачання. Це сприяє зниженню витрат палива, зменшенню експлуатаційних витрат та скороченню викидів забруднювальних речовин у навколишнє середовище.

Впровадження когенераційних технологій на котельнях також забезпечує підвищення маневреності та гнучкості роботи систем теплопостачання. У разі пікових навантажень або аварійних ситуацій когенераційні установки можуть виконувати функцію резервного джерела енергії, що дозволяє підтримувати необхідні параметри теплоносія та уникати повного припинення теплопостачання [46].

Крім того, застосування когенераційних установок сприяє децентралізації електропостачання, що підвищує загальну надійність енергетичної інфраструктури. Використання сучасних автоматизованих систем управління та контролю дає можливість оптимізувати режими роботи обладнання, забезпечити оперативне реагування на зміни навантаження та підвищити ефективність експлуатації опалювальних котелень.

Таким чином, впровадження когенераційних установок у системи теплопостачання є ефективним засобом підвищення надійності роботи опалювальних котелень, зменшення енергетичних витрат та забезпечення стабільного теплопостачання споживачів.

1.4 Впровадження в систему енергопостачання когенераційних установок

Комбіноване виробництво теплової та електричної енергії (когенерація) завдяки високій енергетичній ефективності широко застосовується та активно розвивається у багатьох розвинених країнах світу [47, 48, 49].

Основною перевагою когенераційних технологій є суттєве зменшення витрат палива на виробництво одиниці корисної енергії, а також одночасне скорочення викидів парникових газів і забруднюючих речовин у навколишнє середовище, що визначає їхню стратегічну роль у сучасній енергетичній політиці [48, 49].

Європейська енергетична політика приділяє значну увагу розвитку когенерації. Так, Директива 2004/8/ЕС [3] була спрямована на стимулювання впровадження високоефективних когенераційних установок. У подальшому її положення були розвинуті в Директиві 2012/27/ЄС [4], а також у Законі України «Про

енергетичну ефективність» [1]. Оновлена Директива ЄС 2023/1791 [5] ще більше посилює вимоги до енергоефективності та використання комбінованого виробництва енергії.

В Енергетичній стратегії України до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність» [50] серед ключових напрямів підвищення ефективності централізованого теплопостачання визначено оптимізацію структури джерел генерації з пріоритетом когенераційних технологій та підвищенням загального коефіцієнта корисної дії систем.

Закон України «Про комбіноване виробництво теплової та електричної енергії (когенерацію) та використання скидного енергопотенціалу» [51] створює нормативні передумови та передбачає економічні стимули для розвитку підприємств когенераційного циклу.

До основних типів когенераційних установок належать:

- теплоелектроцентралі (ТЕЦ) з паровими турбінами, де перегріта пара приводить у рух турбогенератор, а відпрацьована пара використовується для теплопостачання;
- газотурбінні установки (ГТУ), у яких електроенергія виробляється газотурбінним двигуном, а теплота відхідних газів утилізується для теплових потреб;
- газопоршнєві установки (ГПУ), де електроенергія виробляється двигуном внутрішнього згоряння, а теплота відпрацьованих газів та систем охолодження використовується для теплозабезпечення.

Слід зауважити, що ефективність когенераційних систем значною мірою залежить від режиму їх експлуатації [52]. Найвищі показники досягаються за умови цілорічної роботи в режимі базового навантаження та узгодження теплової потужності установки з тепловим попитом, зокрема в неопалювальний період – із навантаженням гарячого водопостачання. У сучасних умовах для окремих міст, зокрема Одеси, така схема може бути обмеженою через відсутність централізованого ГВП, однак залишається перспективною в разі його відновлення або будівництва нових інженерних систем.

Впровадження когенерації дозволяє підвищити загальний ККД енергосистем із 36 – 42 % до 80 – 94 %, а також істотно знизити собівартість електричної та теплової енергії [53].

В екологічному плані, крім зменшення викидів унаслідок зниження споживання палива, використання відпрацьованих газів газопоршневих двигунів як компонента окисника палива активного котла дає можливість (баластування факела в топці котла, за аналогією з рециркуляцією) значно (до 2 разів) зменшити вміст оксидів азоту NO у димових газах котла та, за змоги, припинити викиди відпрацьованих газів ГПД безпосередньо в атмосферу.

В Україні існує власне виробництво газопоршневих когенераційних установок на підприємстві ТДВ «Первомайськдизельмаш» [54].

Когенераційні установки виробництва ТДВ «Первомайськдизельмаш» створено на базі газових двигунів-генераторів і дизель-генераторів з утилізацією теплоти газоповітряної суміші після турбокомпресора, охолоджувальної води, мастила та випускних газів двигуна. За рахунок додаткового вироблення теплової енергії у водогрійному теплообміннику-утилізаторі, що входить до комплексу поставки, досягається збільшення загальної потужності та підвищення ККД до 90 %, а також скорочення споживання палива на 30 % у порівнянні з традиційними схемами виробництва теплоти та електроенергії.

Когенераційні установки ТДВ «Первомайськдизельмаш» типу ДВГА забезпечують виробництво електричної енергії з досить високим для ГПУ ККД 36-38 % (трохи нижче, ніж у закордонних, в яких ККД до 44,6 %). Перевагою є їх блокова поставка разом з котлом-утилізатором, з охолодженням відпрацьованих газів ГПД до 120 °С. Як наслідок, коефіцієнт використання палива за заводськими даними в установці досягає 90-92%. Варто також підкреслити високу надійність роботи цих КГУ та значний ресурс роботи до капітального ремонту (80000 год), повний ресурс 240000 год. При цьому вартість таких КГУ істотно (в 2 рази) нижча за вартість закордонних установок аналогічного класу.

Теплова енергія повністю використовується для потреб теплопостачання; електрична енергія використовується для власного споживання замість дорогої

мережевої енергії, надлишок електроенергії спрямовується в мережу та витрачається на потреби інших котелень підприємства за відрахуванням втрат електроенергії під час транспортування. Окупність упровадження таких КГУ становить від 2,5 до 5 років.

Серед газопоршневих когенераційних установок закордонного виробництва можна відзначити ГПУ австрійського бренду «Jenbacher», що пропонує широку лінійку двигунів потужністю від 300 кВт до 10 МВт [55] (рис. 1.1), а також більш сучасні, компактні та економічні ГПУ німецького бренду «MWM» (первинно «MMM», потім «Deutz AG», нині «MWM» є відділенням компанії «Caterpillar Inc.»), що пропонує лінійку машин потужністю від 400 кВт до 4,5 МВт, які відрізняються збільшеним інтервалом між технічним обслуговуванням, загальною ефективністю до 92% і можуть працювати також на паливі що містить водень (до 25% водню) [49] (рис. 1.2).



Рисунок. 1.1 – Зовнішній вигляд когенераційної установки фірми «Jenbacher», Австрія

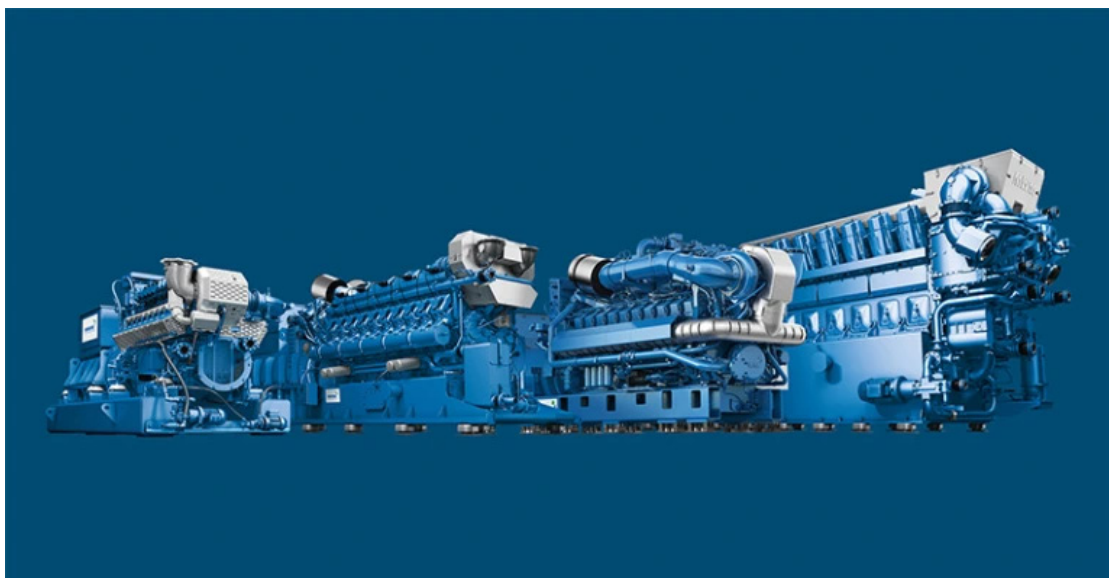


Рисунок. 1.2 – Зовнішній вигляд когенераційної установки фірми «MWM»,
Німеччина

Когенераційні ГПУ компанії «МММ» пропонуються, зокрема, у зручному компактному контейнерному розміщенні з повністю виконаною обв'язкою, готові до підключення на промисловому майданчику, використовуються контейнери виробництва компанії «MWM» або чеської компанії «RSE» (рис. 1.3)



Рисунок. 1.3 – Зовнішній вигляд когенераційної установки фірми «RSE»,
Чехія

Викладене вище дозволяє сформулювати основні переваги запровадження когенераційних систем у промисловій та комунальній енергетиці України, а саме:

- спорудження когенераційних установок (електричною потужністю від 0,5 до 50 МВт) не потребує величезних капіталовкладень. Порівняно з питомими витратами на будівництво нових (потужних) ТЕС 3 000 – 3 500 дол. США/кВт, питома вартість 1 кВт електричної потужності при реалізації міні-ТЕЦ на базі існуючих котелень становить 1 000 – 2 000 дол. США/кВт;

- когенераційні установки дають можливість приносити прибуток, достатній для того, щоб окупити капітальні витрати на їхнє спорудження протягом 3–5 років їхньої експлуатації, за розрахункового терміну експлуатації обладнання 25–30 років (180–192 тис. годин), що в 2–3 рази нижче, ніж середні терміни окупності для електроенергетики;

- розташування когенераційних установок безпосередньо поблизу потенційних споживачів теплової та електро-енергії з базою в регіонах із сформованою інфраструктурою істотно знижує втрати енергії в мережах тепло- і електропередач;

- когенераційні установки мають низькі рівні викидів токсичних речовин (CO і NO_x), що відповідає найжорсткішим міжнародним і державним стандартам, а також знизять викиди CO_2 ;

- підвищує надійність енергопостачання об'єктів в умовах мінливого ринку енергії та високотехнологічного суспільства;

- під час виробництва та транспортування електроенергії кожен учасник ринку закладає свій прибуток, а реалізація когенераційної установки дозволяє отримати електричну енергію за собівартістю;

- можливість заміщати спалювання палива тепловими втратами (відходами) виробничих циклів, тобто корисно використовувати відпрацьоване тепло технологічних процесів для вироблення теплової та електричної енергії;

- економічно доцільного вирішення впровадження та експлуатації пікових потужностей високої ефективності.

Виконаний аналіз стану і тенденцій розвитку світової енергетики та енергетики України дозволяє виділити основні шляхи її розвитку та вдосконалення. Показано, що значні резерви містяться в «малій» енергетиці, яка є основним споживачем паливно-енергетичних ресурсів. Перспективним є упровадження когенераційних технологій з використанням турбін малої потужності, у циклах яких використовуються різні робочі тіла.

1.5 Висновки до розділу 1

1. Проведений аналіз поточного стану теплоенергетики житлово-комунального господарства, на частку якої припадає значна частина споживання енергоресурсів, свідчить про необхідність суттєвої модернізації з метою підвищення енергоефективності та надійності енергопостачання.

2. На основі отриманих даних аналізу споживання енергоресурсів сектором комунальної теплоенергетики запропоновано основні шляхи реалізації програми енергозбереження та удосконалення енерготехнологій.

3. Сучасний стан комунальної теплоенергетики в плані підвищення енергоефективності споживання первинних енергоресурсів та зменшення викидів шкідливих речовин у навколишнє середовище, потребує також підвищення надійності теплопостачання споживачам.

4. Аналіз сучасного стану енергозабезпечення основних джерел теплопостачання виявив основні шляхи щодо підвищення надійності енергопостачання систем централізованого теплозабезпечення об'єктів комунального господарства.

5. Показано перспективу впровадження когенераційних установок для енергозабезпечення об'єктів комунальної теплоенергетики. Для оцінки ефективності впровадження когенераційних установок для енергозабезпечення джерел теплоти потрібно провести додаткові наукові дослідження.

РОЗДІЛ 2. ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ЕНЕРГОПОСТАЧАННЯ ТЕПЛОГЕНЕРУЮЧИХ ПІДПРИЄМСТВ

2.1 Основні вимоги до систем тепlopостачання

Сучасні системи тепlopостачання повинні відповідати широкому колу вимог, які регламентовані чинним законодавством країни [25, 7] та директивами європейського союзу [3, 5], при цьому враховувати актуальні тренди пов'язані із екологічністю та енергоефективністю генерації та транспортування енергоносіїв. Також слід враховувати сьогоденний стан країни [56].

Основні вимоги до сучасних систем тепlopостачання з точки зору експлуатації можна розділити на основні категорії:

- технічна досконалість;
- ступінь екологічності;
- економічна складова;
- надійність експлуатації.

2.1.1 Технічна досконалість систем

Технічна досконалість систем тепlopостачання значною мірою залежить від обладнання, що застосовується, стану теплових мереж, досконалості теплових пунктів, якості технічного обслуговування тощо [57].

Технічна досконалість є поняття комплексне, що включає низку показників:

- сучасність основного та допоміжного обладнання;
- коефіцієнт корисної дії (ККД) елементів основного і допоміжного обладнання та мереж;
- новітність застосованих схемних рішень;
- відповідність режимам роботи споживачів;
- рівень автоматизації роботи системи в цілому;
- динамічні характеристики основного та допоміжного обладнання;
- економічна складова;
- надійність експлуатації;

— допоміжні показники.

Нинішній рівень технічної досконалості централізованих систем теплопостачання доволі невисокий, особливо за складовими, що безпосередньо пов'язані із сучасністю використовуваного обладнання, модернізацією схемних рішень, узгодженням роботи централізованих систем теплопостачання із споживачами тепла, а також із перспективністю розширення кількості підключених абонентів [58]. Окремо слід вказати на недостатність фінансування для підвищення зазначених показників та забезпечення надійності роботи в умовах воєнного стану [59].

Допоміжні показники технічної досконалості відзначаються стабільністю рівня в системах теплових мереж різних типів [60]. Крім того, у практиці створення та використання систем теплопостачання вони не викликають гострих ситуацій. Найважливішим є питання питомих витрат матеріалів на обладнання котельні, на теплові мережі, а насамперед – питання питомої витрати металу елементів, що працюють під тиском [61]. Другим за значущістю є питання засобів, матеріалів і праці, що витрачаються на спорудження теплових мереж та їх технічне обслуговування [62].

2.1.2 Ступінь екологічності систем

Екологічність елементів систем теплопостачання є неприпустимо низькою за викидами та скидами в цілому, але особливо за викидами CO , NO_x , SO_y , $CnHm$, сажі, золи,; за скидами нафтопродуктів, водних розчинів системами водопідготовки, продувки котлоагрегатів, рідких суспензій, емульсій; за відкритим складуванням золи, шлаку та ін.

Промислово-опалювальні котельні за переліченими складовими вносять суттєвий внесок у забруднення навколишнього середовища [63]. І лише за виділенням теплоти їх випереджають теплові мережі.

Наявні обставини дозволяють стверджувати – переважна більшість працюючих систем ТЗ виділяють у навколишнє середовище шкідливі речовини та теплоту зі значним, часто багаторазовим, перевищенням встановлених законом граничних норм [64].

Слід відмітити, що чинні норми України які регламентують шкідливі викиди у навколишнє середовище є досить жорсткими порівняно з нормами інших країн [15, 26].

Ступінь екологічності – поняття комплексне, що включає низку властивостей, які відображають ступінь негативного впливу систем теплопостачання на навколишнє середовище за такими напрямками:

- викиди хімічних шкідливих речовин;
- викиди механічних частинок сажі та золи;
- теплове забруднення навколишнього середовища;
- скидання шкідливих речовин, твердих частинок, нафтопродуктів;
- накопичення твердих відходів спалювання на складах та на відкритих площах;
- негативний вплив електромагнітного полів.

2.1.3 Економічна складова систем теплопостачання

Економічна складова – також комплексне поняття, яке має важливе соціальне значення через обмежену платоспроможність населення, основні напрями якої висвітлюють економічні показники роботи основних елементів системи теплопостачання [65], а саме:

- капітальні вкладення в будівельну частину;
- витрати на паливо, технічне обслуговування, експлуатацію та ремонт;
- ціна елементів обладнання і систем.

Економічність систем теплопостачання у процесі їх функціонування визначається основними складовими: економічністю функціонування котелень та теплових мереж, що в свою чергу виливається у якісне та доступне надання комунальних послуг [66].

Потенційний рівень економічності котелень визначається (за рівних умов) видом і сортом палива, що спалюється. Використання газового палива для роботи котелень забезпечує високий рівень економічності, наближаючись до міжнародних стандартів. На рідкому паливі він набагато нижчий і значно залежить від рівня технічної досконалості системи спалювання палива, яка є тим нижчою, чим

нижча одинична потужність КТ. На твердому паливі рівень економічності в промислово-опалювальних котельнях низький, а в малих установках – неприпустимо низький.

Економічність теплових мереж значно залежить як від технології виконання так і від їх фізичного стану (з урахуванням зносу та пошкоджень). Важливо відзначити, що при нормативних втратах теплоти тепловими мережами до 8%, реальні втрати теплоти можуть досягати 40%, особливо при прокладанні в підтопленому ґрунтовими водами ґрунті або при відкритому прокладанні та сильно пошкодженій чи практично відсутній тепловій ізоляції [68].

При виконанні економічних розрахунків доводиться стикатися з низкою обмежень:

- динамічність зміни економічної кон'юнктури, що робить окремі конкретні показники нехарактерними для розрахункового періоду експлуатації з точки зору їх прогнозування;

- нестабільність кількісних показників, які залежать від відношення попиту на теплову енергію та наявною пропозицією від систем ТЗ на ринку комунального сектора;

- виробництво елементів обладнання на різних підприємствах;

- недостатність обсягу доступної інформації; недостатність достовірності доступної інформації;

Ці обставини змушують проводити економічний аналіз із використанням лише обмеженої кількості надійних вихідних даних.

2.1.4 Надійність систем теплопостачання

Особливої уваги, вивчення та аналізу потребує надійність систем ТЗ, яка визначається їх фізичним станом та зовнішніми впливами в дійсних умовах України.

Існує поширений як типовий спосіб прокладання магістральних теплових мереж у непрохідних збірних негідроцільних коробчастих каналах із засипкою їх ґрунтом, що вимагає відносно невеликих капіталовкладень, але який, в умовах реальної експлуатації, виявився низько ефективним з ряду відомих серйозних

причин. Технічне обслуговування подібних мереж зводиться винятково до ремонтних робіт, причому останнє не тільки частково нівелює вигоду від низьких капіталовкладень, а й виявляється настільки дорогим, що постає питання щодо доцільності даного рішення. Початкова вигода веде до багаторазових за обсягом збитків.

Як показує досвід, у системах ТЗ найменш надійним елементом виявилися теплові мережі закритої прокладки. На відміну від них, мережі з попередньо ізольованих труб, виконаних у нових конструктивних рішеннях, що виключають корозійне ураження, прокладені в прохідних каналах, забезпечені засобами діагностики за допомогою провідних тестів і доступні для профілактичного і поточного технологічного обслуговування. У цих теплових мережах відсутні вказані вище недоліки. Їхня надійність виявилася на рівні, близькому до надійності котелень. Подібний результат досягнуто ціною суттєвого збільшення капітальних вкладень у мережі, подорожчанням експлуатаційного обслуговування. Але при цьому, багаторазово скоротилися витрати на ремонтне обслуговування, причому наведені витрати виявилися істотно меншими в порівнянні з традиційними для нас мережами.

Слід зауважити, що у ряді випадків термін експлуатації труб у магістральних мережах скорочується через корозійне ураження також з боку теплоносія. Це спостерігається при поганій деаерації мережевої води, а також у періоди аварійного підживлення мережі необробленою водою. Проте, важливо зазначити, що при захисті від зовнішньої корозії, тобто при нормалізації ситуації щодо забезпечення підвищеної надійності мереж з цієї точки зору, випадки наднормативного підживлення стають виключно рідкісними епізодами, що трапляються раз на кілька років.

Отже, зазначеним шляхом можна підвищити безвідмовність мереж – цієї найважливішої складової надійності. Відповідно, при цьому зростає і довговічність. Однак ремонтпридатність сучасних нових мереж прогресивного типу виявляється практично на тому самому рівні, що й у традиційних. Проте частота проведення ремонтів із заміною труб зменшується більш ніж на порядок.

Ще одним із факторів, що суттєво впливає на надійність систем теплопостачання в умовах сучасного стану, є безперебійність енергопостачання основних вузлів систем центрального теплозабезпечення.

2.2 Забезпечення надійності електропостачання для стабільної роботи систем теплопостачання

2.2.1 Основні аспекти забезпечення надійності систем теплопостачання

Робота існуючих підприємств генерації тепла практично неможлива без стабільного електропостачання, необхідного для систем автоматики та регулювання, насосів, вентиляторів, освітлення та інше. Рівень надійності постачання електроенергії споживачам в більшості розвинених країн приймається на рівні 0,999, що відповідає, приблизно, одночасній перерві в енергопостачанні на протязі 24 годин за 2,75 року, або, в середньому, менш чим на 9 годин на рік [69]. При такій короткочасній втраті електроживлення наявні системи безпеки систем теплопостачання, а також з урахуванням їх інерційності, запобігають важким аварійним ситуаціям з втратою живучості систем, та зберігають можливість оперативного відновлення роботи устаткування котельні.

Проте, при значно більш тривалому відключенні електроживлення наприклад через стихійні негоди чи руйнування електричних станцій, підстанцій та мереж, що має в наш час місце в Україні, наслідки можуть бути досить серйозними. Тривала зупинка котельні теплопостачання в зимовій період при екстремально низьких температурах може призвести до виведення з ладу основного та допоміжного устаткування, теплових мереж та внутрішньо домових систем опалення багатоквартирних житлових будинків, лікарень, навчальних закладів і, як результат, страждання населення. Забезпечення високої надійності роботи енергетичних систем можливе за рахунок високих показників надійності устаткування, що використовується, та за рахунок відповідної структури та резервування систем електро-теплогенерації.

2.2.2 Системи резервування електропостачання основних елементів централізованого теплопостачання.

Поширені в сучасних умовах України заходи щодо резервування електропостачання шляхом використання мобільних електрогенераторів безумовно сприяють підвищенню надійності функціонування систем теплопостачання. Однак такий підхід слід розглядати переважно як тимчасовий або аварійний захід, реалізація якого значною мірою стала можливою завдяки міжнародній технічній та фінансовій підтримці. Водночас використання мобільних генераторів супроводжується значними експлуатаційними витратами, пов'язаними зі споживанням дизельного палива або бензину. Крім того, за відсутності потреби в їх постійному використанні відповідне обладнання фактично виступає у вигляді невикористовуваних матеріально-технічних ресурсів, що знижує загальну економічну ефективність такого способу резервування електропостачання [42].

У зв'язку з цим більш перспективним та економічно обґрунтованим напрямом підвищення надійності енергозабезпечення систем теплопостачання є впровадження власних генеруючих потужностей, інтегрованих у технологічний цикл роботи котелень середньої та великої потужності. Особливий інтерес становить застосування когенераційних технологій, що передбачають одночасне виробництво теплової та електричної енергії в межах єдиного технологічного процесу. Рациональна інтеграція процесів теплогенерації та електрогенерації забезпечує більш повне використання енергетичного потенціалу палива, підвищення коефіцієнта використання паливно-енергетичних ресурсів та створює передумови для досягнення суттєвого економічного ефекту при експлуатації систем теплопостачання.

Розглянемо існуючі варіанти резервування та повного забезпечення потреб котелень теплопостачання в електричній енергії. Для проведення порівняльного аналізу обрано найбільш поширені типи котелень, а саме: котельні з водогрійними котлами та безпосереднім підключенням до теплової мережі, а також котельні з паровими котлами та пароводяними бойлерами.

Для газових котелень, оснащених водогрійними котлами, можуть бути реалізовані декілька варіантів резервування електропостачання. Перший варіант пе-

редбачає використання резервного електрогенератора з двигуном внутрішнього згоряння, який вводиться в роботу лише у разі припинення подачі електроенергії від зовнішньої мережі. Як правило, такі установки працюють на рідкому паливі (рис. 2.1а).

Другий варіант полягає у використанні генераторної установки для повного або часткового покриття власних потреб котельні в електричній енергії. Така установка функціонує в постійному режимі, а теплота відпрацьованих газів двигуна внутрішнього згоряння утилізується та передається до теплової мережі за допомогою газовадяного теплообмінника. Як паливо для роботи генераторної установки може використовуватися природний газ, аналогічно до основного котельного обладнання (рис. 2.1б).

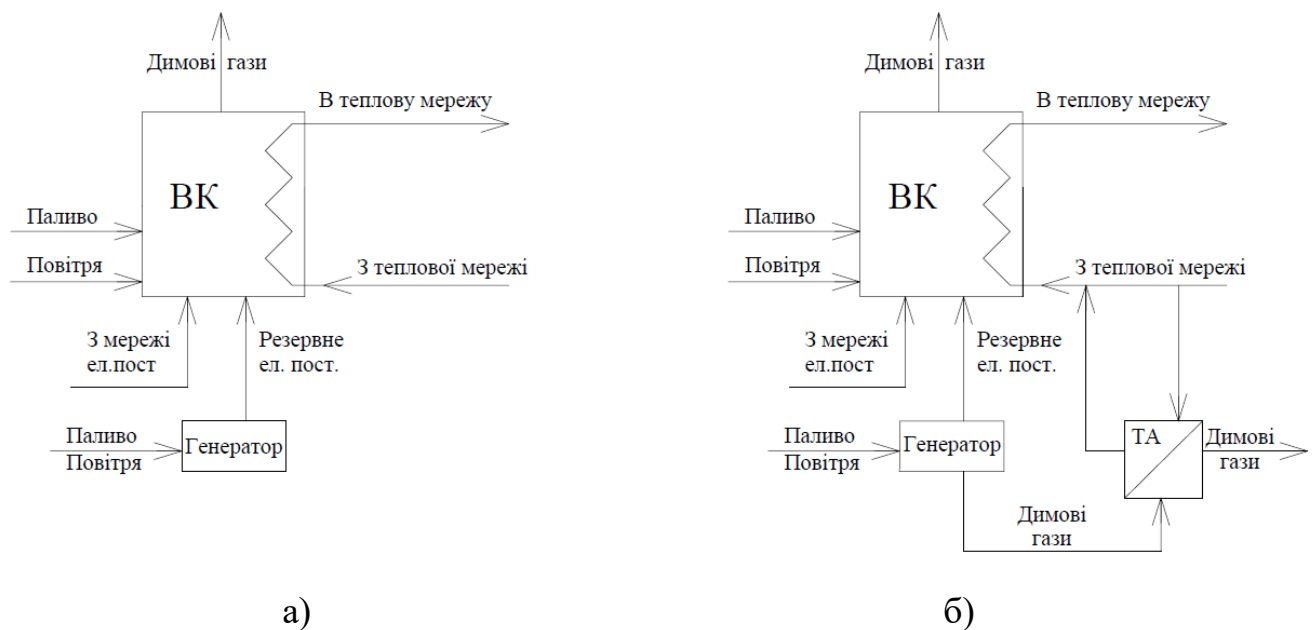


Рисунок 2.1 – Варіанти резервування електропостачання водогрійної котельні: а) застосування резервного генератора, б) застосування генератора повного, або часткового електрозабезпечення за власний рахунок. ВК-водогрійний котел; ТА-теплообмінний апарат.

Запропоновані варіанти дозволяють підвищити рівень надійності електрозабезпечення котелень та забезпечити безперервність функціонування систем тепlopостачання в умовах порушення зовнішнього електропостачання. Крім того, використання генераторних установок із утилізацією скидної теплоти створює

передумови для реалізації когенераційного режиму роботи та підвищення загальної енергетичної ефективності системи.

Розглянуті варіанти резервного електропостачання можуть бути реалізовані не лише для котелень з водогрійними котлами, але й для котелень, оснащених паровими котлами. Водночас наявність пари як робочого середовища створює додаткові можливості для впровадження більш ефективних схем власної електрогенерації. Одним із перспективних технічних рішень є застосування парової турбіни (ПТ) невеликої потужності з протитиском, у якій відпрацьована після турбіни пара спрямовується до пароводяного теплообмінника для передачі додаткової кількості теплоти в систему теплопостачання.

Застосування таких мікротурбінних установок характеризується високим рівнем експлуатаційної надійності та відносно невисокими капітальними витратами. Це обумовлено їх роботою за помірних параметрів пари, відсутністю необхідності використання циліндра низького тиску, а також конденсаційної установки із системою охолодження. Внаслідок цього спрощується конструкція енергетичної установки, знижуються експлуатаційні витрати та підвищується загальна надійність її функціонування.

Ефективність запропонованого рішення значною мірою визначається можливістю реалізації когенераційного режиму роботи, за якого одночасно здійснюється виробництво електричної та теплової енергії. Такий підхід забезпечує більш повне використання енергетичного потенціалу палива та сприяє підвищенню загальної ефективності системи енергозабезпечення.

Для установок невеликої потужності, зокрема до 100 кВт, перспективним є використання безлопатевих парових турбін типу Тесла [70]. Зазначений різновид парових турбін характеризується конструктивною простотою, високою надійністю та економічністю експлуатації. Важливою перевагою таких установок є можливість ефективної роботи на вологій парі, що розширює сфери їх практичного застосування у складі когенераційних систем теплопостачання та резервного енергозабезпечення.

На рис. 2.2 наведено схему енергетичних потоків котельні, оснащеної паровим котлом та паротурбінною установкою для виробництва електричної енергії. У запропонованій схемі пара, відпрацьована в паровій турбіні, може спрямовуватися як до основного пароводяного теплообмінника (бойлера), так і до окремого теплообмінного апарата. Така організація енергетичних потоків забезпечує можливість одночасного виробництва теплової та електричної енергії, сприяє підвищенню ефективності використання теплоти пари.

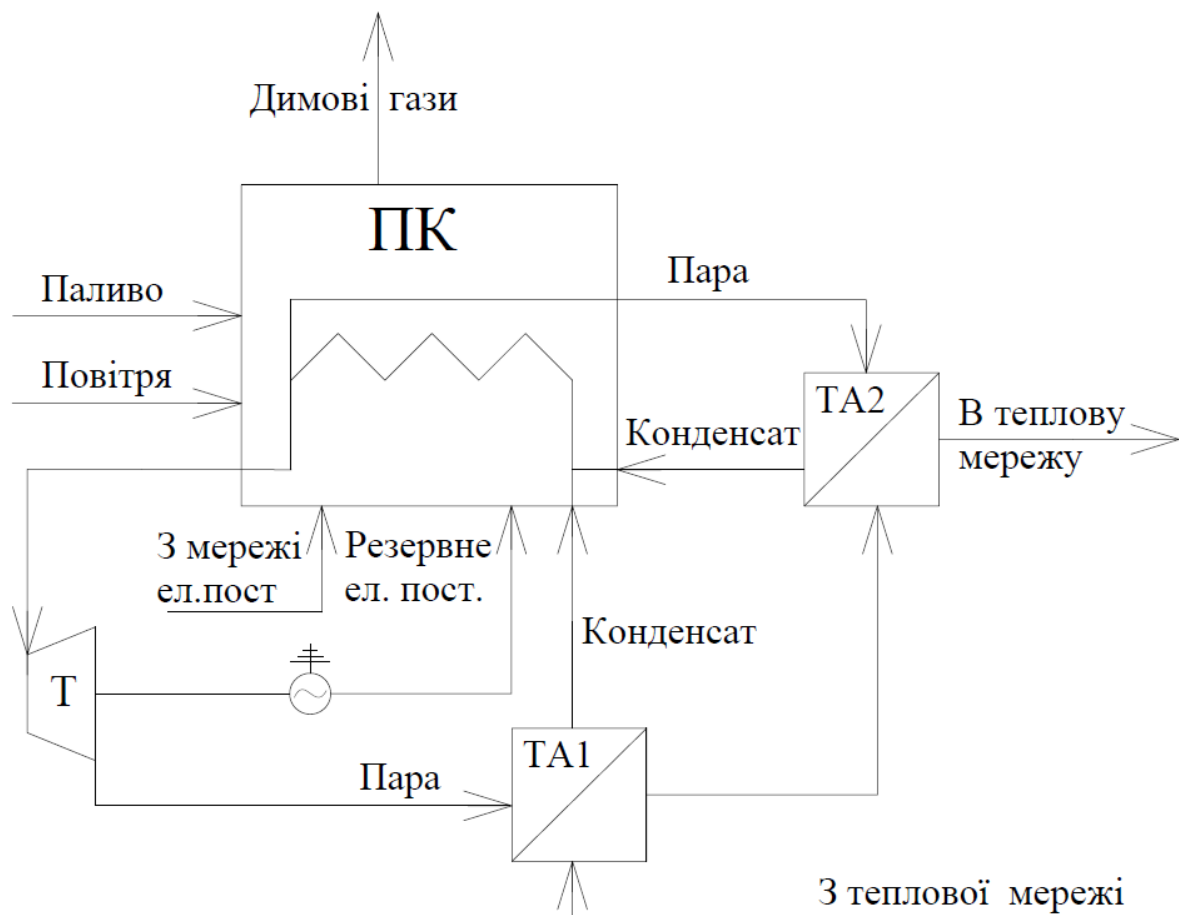


Рисунок 2.2 – Схема автономного електропостачання для парової котельні на основі парової турбіни. ПК-паровий котел; ТА-теплообмінний апарат; Т- турбіна.

Таким чином, актуальним науково-практичним завданням є забезпечення надійного тепlopостачання об'єктів комунальної теплоенергетики в сучасних умовах функціонування енергетичного сектору України, які характеризуються

наявністю численних зовнішніх та внутрішніх чинників, що можуть негативно впливати на стабільність роботи енергетичної інфраструктури. До таких чинників належать пошкодження об'єктів генерації та передачі енергії, порушення паливо-забезпечення, аварійні ситуації в електричних мережах, а також інші дестабілізуючі впливи техногенного та воєнного характеру.

Для обґрунтування вибору найбільш ефективних технічних рішень необхідно виконати порівняльний аналіз різних схем резервування електропостачання та провести техніко-економічне оцінювання їх застосування. Такий підхід дозволить визначити ефективність використання різних джерел енергії з точки зору підвищення надійності електропостачання централізованих систем теплопостачання, а також оцінити їх вплив на енергетичні, економічні та експлуатаційні показники функціонування об'єктів комунальної теплоенергетики [71].

2.2.3 Системи забезпечення надійності енергопостачання на базі парового котла та парової турбіни

Результати проведеного техніко-економічного аналізу енергопостачання більшості котелень в Україні показують, що питоме споживання основним обладнанням електроенергії становить 20 – 30 кВт·год, що, відповідно, вказує на необхідну розрахункову потужність основних споживачів електроенергії – 20–30 кВт на 1 Гкал/год потужності котла, або $k = \frac{N_T}{Q_{\delta}} = (0,025 \div 0,035)$ кВт/кВт. Для варіанта схеми електропостачання з паровим котлом (рис. 2.2.) необхідно визначити основні параметри для парової турбіни.

Витрата пари в теплообмінний апарат (бойлер) для отримання необхідної кількості теплоти – Q_{δ} складе

$$G_{\delta} = \frac{Q_{\delta}}{(h_n - h_k) \cdot \eta_{\delta}},$$

де h_n та h_k – ентальпія відповідно пари на виході з котлу та конденсату в бойлері, кДж/кг;

η_{δ} – ККД теплообмінного апарата, який є досить високим – 0,99.

Витрата пари у турбіну потужністю – N_T можна визначити за формулою:

$$G_T = \frac{N_T}{(h_{\pi} - h_{\pi}^B) \cdot \eta_T \cdot \eta_M \cdot \eta_e},$$

де h_{π}^B – ентальпія насиченої або вологої пари за турбіною, кДж/кг,

η_T, η_M, η_e – відповідно внутрішній ККД турбіни, механічний ККД турбогенератора та електричний ККД генератора.

Таким чином, при сумарній паропроductивності котла $G_K = G_T + G_{\delta}$, а відсоток пари котла, яка піде в турбіну – $\mu(\%)$ становитиме:

$$\mu = \frac{G_T}{G_{\delta} + G_T} \cdot 100 = \frac{1}{\frac{G_{\delta}}{G_T} + 1} \cdot 100$$

З урахуванням формул для визначення G_{δ} та G_T

$$\mu = \frac{1}{\frac{(h_{\pi} - h_{\pi}^B) \cdot \eta_T \cdot \eta_M \cdot \eta_e}{k \cdot (h_{\pi} - h_K) \cdot \eta_{\delta}} + 1} \cdot 100$$

Для умов парового котлу (один із розповсюджених в системах теплопостачання) типу ДКВР 4–13 [71] з параметрами пари 1,3 МПа та 194 °С при значенні $k = 0,030$ та при загально прийнятих значеннях ККД елементів системи отримаємо відсоток відбору пари на турбіну:

$$\mu = \frac{1}{\frac{(2793 - 2250) \cdot 0,8 \cdot 0,85 \cdot 0,9}{0,03 \cdot (2793 - 813) \cdot 0,99} + 1} \cdot 100 = 15\%$$

При застосуванні безлопатевої турбіни (вони допускають значно більшу вологість пари на виході із циліндру), відсоток використання пари для приводу турбіни можна зменшити до 0,08. При цьому необхідна розрахункова електрична потужність паротурбінного генератора при роботі в системі теплопостачання для умов парового котлу типу ДКВР 4–13 складає біля 45 кВт.

2.2.4 Системи забезпечення надійності енергопостачання на базі газотурбінної установки (ГТУ)

Для систем теплопостачання великої потужності, особливо за наявності споживачів теплової енергії на потреби опалення, гарячого водопостачання та технологічні потреби протягом усього року, доцільним є використання власних джерел електрогенерації на базі газотурбінних установок (ГТУ). Застосування таких установок дозволяє підвищити рівень енергетичної незалежності підприємств теплоенергетики, а також забезпечити надійне електропостачання об'єктів у разі порушення роботи зовнішніх електричних мереж.

В Україні існує значний науково-технічний та виробничий потенціал у сфері розроблення і виготовлення газотурбінного обладнання. Вітчизняні підприємства виробляють енергетичні газові турбіни, а також турбіни спеціального призначення, зокрема авіаційні, суднові та транспортні. Після відповідної модернізації такі установки можуть бути адаптовані для використання як приводи електрогенераторів у складі автономних або когенераційних енергетичних комплексів.

Практика використання газотурбінних двигунів в енергетичному секторі набула значного поширення в багатьох країнах світу. Зокрема, відомі численні приклади застосування авіаційних двигунів, які вичерпали свій нормативний льотний ресурс, для виробництва електричної енергії. Такі установки характеризуються порівняно невисокою вартістю, високою надійністю та здатністю забезпечувати тривалу експлуатацію в складі енергогенеруючих систем [72]. З огляду на наявність відповідної виробничої бази та досвіду експлуатації газотурбінної техніки, зазначений підхід може розглядатися як перспективний напрям розвитку розподіленої генерації в Україні.

Газотурбінні установки характеризуються компактністю, високою маневреністю та швидким виходом на робочі режими. Крім того, вони здатні працювати як на газоподібному, так і на рідкому паливі, зокрема на природному газі, керосині або спеціалізованому газотурбінному паливі [73]. Сукупність зазначених характеристик забезпечує широкі можливості їх використання в системах автономного та резервного електропостачання об'єктів теплоенергетики.

Важливою перевагою газотурбінних установок є зниження питомих капітальних витрат зі збільшенням встановленої потужності. У зв'язку з цим впровадження ГТУ є найбільш доцільним для великих теплопостачальних підприємств, груп котелень, об'єднаних у єдину систему теплозабезпечення, а також для об'єктів, що мають можливість здійснювати відпуск надлишкової електричної енергії до зовнішньої енергосистеми. Додатковою перевагою є можливість роботи в режимах покриття пікових електричних навантажень або резервування електропостачання відповідальних споживачів.

Разом із тим експлуатація газотурбінних установок виключно в режимі виробництва електричної енергії характеризується порівняно невисокими показниками енергетичної ефективності. Коефіцієнт корисної дії таких установок, як правило, становить близько 30 %, що обумовлено значними втратами теплоти з відпрацьованими газами. Температура газів на виході з турбіни залежить від параметрів робочого тіла перед турбіною та зазвичай перебуває в межах 300–500 °С.

Суттєве підвищення ефективності використання паливно-енергетичних ресурсів може бути досягнуте шляхом утилізації теплоти відпрацьованих газів у газоводяних теплообмінниках. За умови охолодження газів до температури 100–120 °С коефіцієнт використання енергії палива газотурбінної установки може досягати 60 %. При цьому понад половину енергії палива перетворюється на електричну енергію, яка має найбільшу споживчу цінність, а решта використовується для покриття теплових навантажень систем опалення та гарячого водопостачання. Такий режим роботи відповідає принципам когенерації та забезпечує суттєве підвищення загальної енергетичної та економічної ефективності систем теплопостачання.

На рис. 2.3 наведено схему основних енергопотоків котельні з ГТУ та газоводяним теплообмінним апаратом для підігріву мережевої води за рахунок утилізації тепла скидних газів після ГТУ [42].

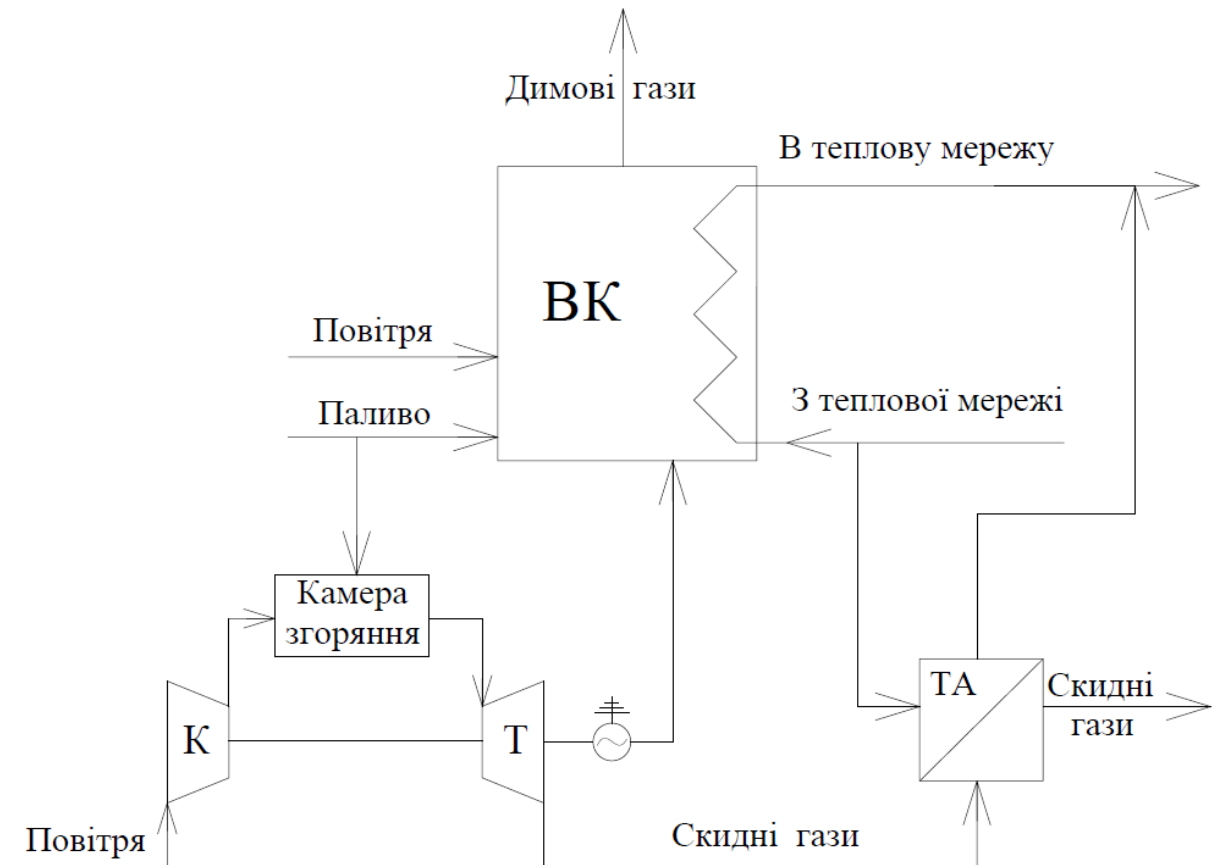


Рисунок 2.3 – Система забезпечення електроживлення з газотурбінною енергоустановкою. ВК-водогрійний котел; ТА-теплообмінний апарат; Т-турбіна, К – компресор.

Слід зазначити, що характеристики газотурбінних установок у режимі виключно електрогенерації достатньо повно досліджені та описані в науково-технічній літературі залежно від схемних рішень і робочих параметрів. Водночас для умов комбінованого виробництва електричної та теплової енергії в складі систем теплопостачання з опалювальними котельнями підходи до оцінювання ефективності та результати аналізу можуть суттєво відрізнятися від традиційних.

Аналіз ефективності системи теплопостачання з газотурбінною установкою автономного електрозабезпечення є більш складним порівняно з системами на базі парових турбін, що обумовлює доцільність використання спеціалізованого програмного забезпечення. З цією метою було розроблено програмний продукт у середовищі Visual Basic, який дозволяє виконувати розрахунок та аналіз режимів

роботи ГТУ в складі систем теплопостачання. Загальний вигляд робочого вікна програми наведено на рис. 2.4. За необхідності програмний комплекс може бути використаний також для аналізу енергетичних газотурбінних установок без утилізації теплоти відпрацьованих газів або ГТУ з регенерацією теплоти у теплообміннику після компресора для попереднього підігріву повітря [42].

Рисунок 2.4 – Робоче вікно програми для розрахунків та аналізу ГТУ в системі теплозабезпечення

У разі використання газотурбінної установки в складі теплогенеруючої системи в когенераційному режимі виникає можливість варіювання в широких межах параметрів та характеристик її елементів, зокрема котельного обладнання, з метою визначення оптимальних технічних рішень. Найбільший вплив на показники ефективності ГТУ в системах теплопостачання мають параметри робочого газу перед турбіною, насамперед його температура та тиск, температура зовнішнього повітря, а також допустима температура охолодження відпрацьованих газів у теплообміннику-регенераторі. Дослідження впливу зазначених факторів дає змогу оцінити енергетичну та економічну ефективність роботи установки й обґрунтува-

ти раціональні режими її експлуатації в складі когенераційних систем теплопостачання.

2.2.5 Основні техніко-економічні показники роботи ГТУ у системі безперебійного енергопостачання

Можливий діапазон зміни температури газу у розрахунковій програмі (рис. 2.4) від 400 °С до 1600 °С, тиску – від 3 бар до 30 бар, а температури зовнішнього повітря від –30 °С до +35 °С. Результат розрахунку відпуску теплоти споживачам наводиться як в МВт, так і в Гкал/годину [42].

Важливим параметром, що впливає на ефективність когенераційної системи з газотурбінною установкою, є температура відпрацьованих газів після газоводяного теплоутилізатора. Зниження цієї температури сприяє більш повному використанню теплового потенціалу продуктів згоряння та підвищенню загальної ефективності системи. У межах даного дослідження температура газів на виході з утилізатора розглядалася в діапазоні 80–140 °С. Водночас надмірне зниження температури може призвести до досягнення точки роси та інтенсифікації корозійних процесів на поверхнях теплообмінного обладнання, особливо за наявності в газовому середовищі корозійно-активних компонентів і використанні матеріалів з недостатньою корозійною стійкістю.

Аналіз результатів досліджень (рис. 2.5), присвячених оцінюванню впливу температури та відповідного їй тиску робочого газу перед турбіною на величину утилізованої теплоти при різних температурах газів після теплообмінника-утилізатора, свідчить про наявність чітко вираженого максимуму теплової потужності для температур відпрацьованих газів 120 °С та 140 °С. При зниженні температури газів після утилізатора максимум теплової ефективності зміщується в область нижчих початкових параметрів робочого тіла.

Суттєвим результатом проведеного аналізу є встановлення того факту, що оптимальна температура газу перед турбіною не перевищує 800 °С. Це свідчить про можливість використання газотурбінних установок середнього температурного рівня без необхідності застосування високотемпературних турбін, вартість яких значно зростає через потребу використання спеціальних жароміцних матеріалів

для лопаток проточної частини, а також складних технологій виготовлення та систем повітряного охолодження лопаток із відбором повітря від компресора. Зазначена обставина сприяє зниженню капітальних витрат та підвищенню економічної доцільності впровадження газотурбінних когенераційних установок у системах теплопостачання.

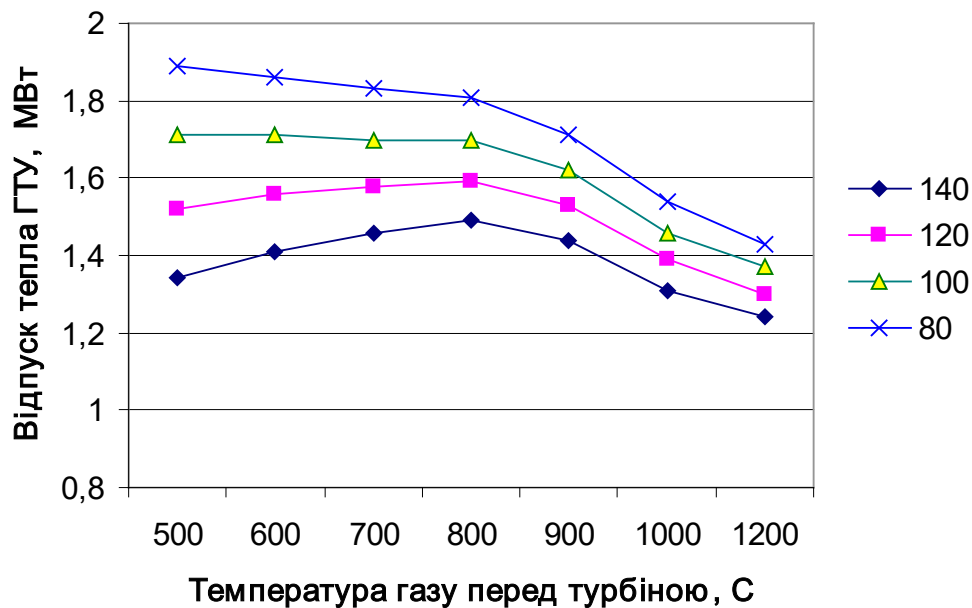


Рисунок 2.5 – Вплив параметрів перед ГТУ потужністю 2 МВт на кількість утилізованої теплоти при вибраній температурі за теплообмінником

Для енергетичного балансу системи важливе значення має співвідношення між електричною потужністю, коефіцієнтом корисної дії газотурбінної установки та величиною теплової енергії, що відпускається споживачам. Зазначені показники визначаються як параметрами основного обладнання ГТУ, так і зовнішніми умовами експлуатації. На рис. 2.6 наведено залежність ККД газотурбінної установки від параметрів робочого газу перед турбіною та температури зовнішнього повітря. Вплив цих факторів на ефективність роботи установки описується термодинамічними закономірностями та може бути оцінений на основі термічного коефіцієнта корисної дії η_t еквівалентного циклу Карно.

$$\eta_t = 1 - \frac{T_{2m}}{T_{1m}},$$

де T_{1m} та T_{2m} – середньотермодинамічні температури, відповідно, в процесі підводу теплоти до циклу та відводу теплоти з циклу в зовнішнє середовище, К.

Саме тим визначається характер залежності ККД від вказаних параметрів.

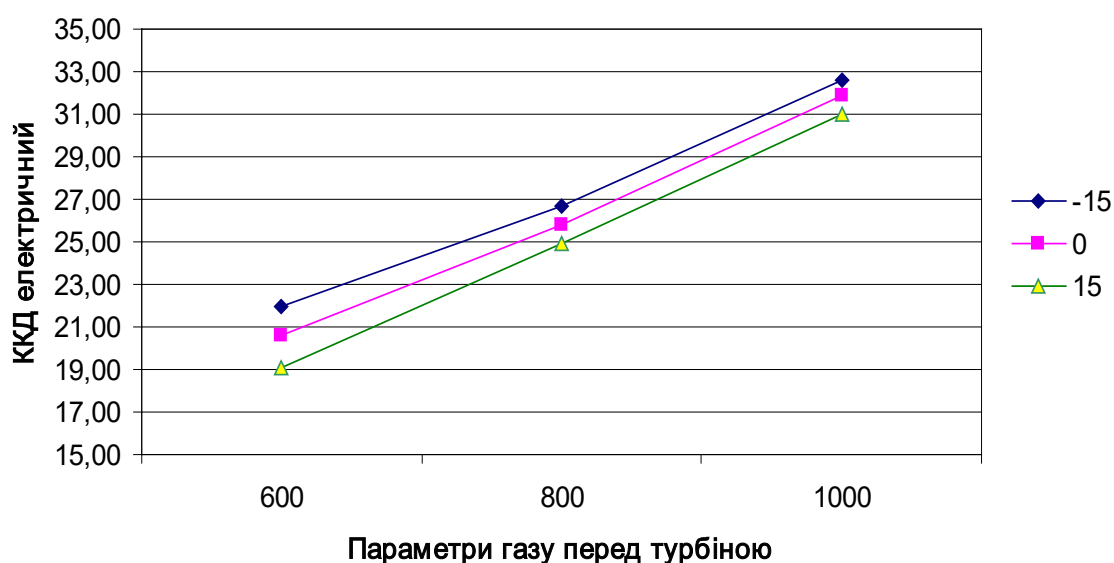


Рисунок 2.6 – Електричний ККД ГТУ залежно від параметрів газу перед турбіною та температури повітря

У разі використання газотурбінних установок у системах теплопостачання більш інформативним показником ефективності є коефіцієнт використання енергії палива (КВП), оскільки він враховує витрати палива як на виробництво електричної енергії, так і на генерацію теплоти.

Як показують результати досліджень (рис. 2.7), температура зовнішнього повітря має менший вплив на значення КВП порівняно з її впливом на коефіцієнт корисної дії установки. Крім того, підвищення температури та тиску робочого тіла перед турбіною не супроводжується пропорційним зростанням ефективності використання палива. Це підтверджує недоцільність застосування в системах теп-

лопостачання газотурбінних установок із надвисокими початковими параметрами, оскільки значне збільшення їх вартості не забезпечує відповідного приросту енергетичної ефективності.

Слід також враховувати, що структура системи тепlopостачання та підходи до резервування електропостачання визначаються типом теплогенеруючого підприємства — місцевої, квартальної, районної або міської котельні. За наявності значної кількості котлоагрегатів оснащення кожного з них автономними електрогенеруючими установками є технічно та економічно недоцільним.

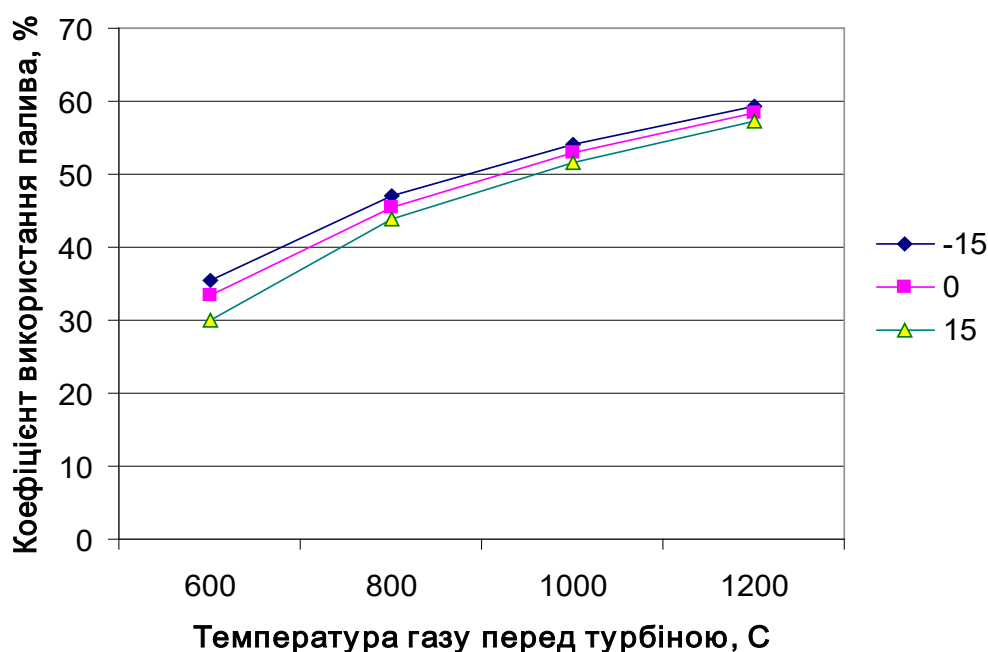


Рисунок 2.7 – Вплив параметрів газу перед ГТУ та температури повітря на коефіцієнт використання палива

У котельні може бути передбачена одна або дві електрогенеруючі установки, зокрема для забезпечення резервування електропостачання. Крім того, використання газотурбінних установок достатньої потужності дозволяє організувати автономне електропостачання групи територіально наближених котелень малої та середньої потужності. Такий підхід сприяє зниженню капітальних та експлуатаційних витрат за рахунок скорочення кількості обладнання та спрощення його обслуговування.

В умовах впливу зовнішніх дестабілізуючих чинників, зокрема стихійних лих, воєнних дій або аварій в енергетичній інфраструктурі, надійність електропостачання теплогенеруючих підприємств є одним із визначальних факторів забезпечення безперебійного теплопостачання. Тривале припинення роботи котелень у зимовий період може призвести до критичних наслідків для всієї системи теплопостачання — від джерела генерації теплоти до кінцевих споживачів. Втрата працездатності системи супроводжується значними економічними збитками та потребує тривалого часу для відновлення її функціонування [42].

2.3 Ймовірності відмов енергопостачання основних елементів систем централізованого теплопостачання в надзвичайних ситуаціях.

2.3.1 Екстремальні умови експлуатації систем теплопостачання

Основними чинниками, що формують екстремальні умови експлуатації систем теплопостачання в країнах Східної Європи, є низькі температури зовнішнього повітря в зимовий період, сильні вітрові навантаження, інтенсивні опади та інші несприятливі кліматичні явища [74]. В умовах України до зазначених факторів додатково належать наслідки воєнних дій, зокрема пошкодження енергетичної та комунальної інфраструктури, перебої у постачанні палива, води та електроенергії, а також обмежені можливості проведення аварійно-відновлювальних робіт у зонах ураження.

Індивідуальні системи опалення, поширені переважно в сільській місцевості та приміських районах, характеризуються відносно високою стійкістю до впливу екстремальних умов. Це обумовлено можливістю використання різних видів палива, замкнутим контуром циркуляції теплоносія та, у багатьох випадках, відсутністю критичної залежності від зовнішнього електропостачання [6].

Водночас централізовані міські та районні системи теплопостачання житлових, адміністративних і промислових будівель є значно складнішими технічними комплексами. До їх складу входять джерела генерації теплової енергії (котельні або ТЕЦ), теплові мережі та системи теплоспоживання. Кожен із зазначених еле-

ментів включає значну кількість обладнання та інженерних вузлів, надійність роботи яких може істотно знижуватися під впливом зовнішніх дестабілізуючих факторів.

2.3.2 Методи дослідження надійності елементів систем теплопостачання

Оцінювання надійності складних технічних систем ґрунтується на визначенні ймовірностей безвідмовної роботи або відмови окремих елементів P_i протягом заданого періоду часу (року, опалювального сезону або доби). Значення цих показників знаходяться в межах від 0 до 1, причому сума ймовірностей безвідмовної роботи та відмови будь-якого елемента завжди дорівнює одиниці [75].

У теорії ризику для аналізу складних систем широко застосовуються методи побудови дерев відмов і дерев подій. Перевагою вказаного метода є здатність визначати ймовірності відмов в системі загалом при наявності значень ймовірності відмов її елементів в надзвичайних умовах експлуатації [76].

Найскладнішим етапом побудови дерева подій є визначення ймовірностей відмов кожного елементу системи P_i [77]. Для цього використовуються різні підходи [78]. До них належать розрахункові методи, що базуються на оцінці міцності та довговічності обладнання з урахуванням умов експлуатації, тривалості роботи та властивостей конструкційних матеріалів. Поширеним підходом є також аналіз статистичних даних щодо частоти відмов обладнання за тривалий період експлуатації, що за належної математичної обробки забезпечує високу достовірність отриманих показників надійності.

У випадках недостатності статистичної інформації, нетривалого терміну експлуатації обладнання або використання принципово нових технічних рішень доцільним є застосування методу експертних оцінок [79]. Ефективність цього підходу значною мірою визначається кваліфікацією експертів, їхнім практичним досвідом та рівнем професійної підготовки.

Кожен із наведених методів має власні особливості, переваги та обмеження. У даній роботі основну увагу приділено методам збору та статистичної обробки

експлуатаційних даних, а також методу експертних оцінок як одному з найбільш універсальних інструментів аналізу надійності складних технічних систем [80].

2.3.3 Визначення ймовірності відмов систем енергозабезпечення методом експертних оцінок

Основною метою даного дослідження є проведення аналізу ймовірності відмов елементів систем теплозабезпечення в екстремальних умовах. Особлива увага приділяється оцінюванню надійності енергетичного обладнання за умов впливу дестабілізуючих факторів зовнішнього середовища.

Як приклад розглянуто визначення ймовірності відмови підключення резервного електрогенератора $K_{\mathcal{P}}$ у разі відключення або пошкодження основної системи електропостачання із застосуванням методу експертних оцінок. Для проведення дослідження було залучено десять експертів — фахівців та аспірантів у галузях теплоенергетики та електроенергетики, які мають відповідний практичний і науковий досвід.

За результатами анонімного опитування було отримано експертні оцінки ймовірності відмови електропостачання котельні від централізованих систем енергозабезпечення, які наведено в табл. 2.1 [75].

Застосування методу експертних оцінок передбачає вирішення таких завдань:

- оцінювання ступеня узгодженості експертних суджень;
- визначення узагальненої експертної оцінки ймовірності відмови електропостачання котельні від централізованих систем енергозабезпечення.

Таблиця 2.1 – Значення ймовірності відмов електроживлення котельні від центральних систем енергопостачання різними експертами

Експерти у	Ймовірність відмови				
	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
1	3	1	2	4	5
2	2	1	3	5	4
3	2	3	1	4	5
4	3	2	1	5	4
5	3	2	1	4	5
6	2	1	3	4	5
7	3	2	1	4	5
8	2	3	1	5	4
9	3	1	2	4	5
10	2	3	1	4	5

В представленій таблиці (2.1.) експертна оцінка проставляється за умов: експерт присвоює 1 бал величині ймовірності відмови, що є найбільш реальною, а максимальний бал 5 – ймовірності, що є найменш реальною. Оцінка узгодженості дій експертів здійснюється шляхом розрахунку коефіцієнта конкордації (погодження) [75].

Сумарний ранг ймовірності за фактичними експертними оцінками всіх експертів з таблиці 2.1 вихідних даних наведено в табл. 2.2

Таблиця 2.2 Сумарний ранг ймовірності за фактичними експертними оцінками всіх експертів

Експерти	Ймовірність відмови				
	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
Сумарний ранг ймовірності	25	19	16	43	47

Далі розраховується пріоритетність – кількість експертів, які оцінили відповідну частку рангом 1 і результати наведені в табл. 2.3.

Таблиця 2.3 Пріоритетність відмов – оцінка експертів.

Ймовірності відмови	Кількість відповідей експертів
0,5	0
0,4	4
0,3	6
0,2	0
0,1	0

Сумарний ранг ймовірності відмови у випадку повного збігу думок експертів визначається як добуток пріоритетної (вищої) експертної оцінки та кількості експертів, що брали участь в опитуванні (табл. 2.4).

Таблиця 2.4 Сумарний ранг ймовірності відмови.

Експертна оцінка	Ймовірність відмови				
	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
Пріоритетність	0	4	6	0	0
Сумарний ранг збіг- x_{if}	0	40	60	0	0

Розрахунок дисперсії (відхилення значення випадкової величини від центру розподілу) фактичних оцінок виконується за формулою [75]:

$$\sigma_{\phi}^2 = \frac{1}{m} \sum_1^m (x_{i\phi} - \bar{x})^2 = \frac{(0-30)^2 + (40-30)^2 + (60-30)^2 + (0-30)^2 + (0-30)^2}{5} = 740$$

де $x_{i\phi}$ – фактичні експертні оцінки (за сумарним рангом збігу);

$\bar{x}$ – середнє значення експертної оцінки;

m – кількість варіантів оцінки.

Розрахунок середнього значення сумарної оцінки проводиться за формулою:

$$\bar{x} = \frac{n \cdot (m+1)}{2} = \frac{10 \cdot (5+1)}{2} = 30$$

де n – кількість експертів.

Для оцінки узгодженості дій експертів визначається коефіцієнт конкордації [77]. Значення коефіцієнта конкордації (W) змінюється в межах 0–1: при $W = 0$ вважається, що узгодженості в діях немає, а при $W = 1$ – узгодженість думок повна. В інших випадках встановлюється нормативне значення коефіцієнта конкордації, з яким порівнюється його фактичне значення. Найчастіше нормативне значення коефіцієнта конкордації $W = 0,5$. У випадку $W > 0,5$ вважають, що думки експертів більшою мірою узгоджені, і навпаки. У розрахунковому випадку

$$W = \frac{12 \cdot \sigma_{\phi}^2}{n^2(m^3 - m)} = \frac{12 \cdot 740}{10^2 \cdot (5^3 - 5)} = 0,74$$

Отриманий розрахунковий коефіцієнт конкордації становить $W = 0,74$, що більше 0,5, вказане свідчить про добрий рівень узгодженості думок експертів.

Наступним кроком є розрахунок сумарної експертної оцінки, який виконано за допомогою формули середньої зваженої [75]:

$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^m p_i \cdot h_i}{\sum_{i=1}^m h_i} = \frac{0,5 \cdot 0 + 0,4 \cdot 4 + 0,3 \cdot 6 + 0,2 \cdot 0 + 0,1 \cdot 0}{0 + 4 + 6 + 0 + 0} = 0,34$$

де p_i – варіант ймовірності відмови резервного генератора;

h_i – пріоритетність відмови.

В результаті розрахунків середня ймовірність відмови електропостачання котельні від централізованих систем енергозабезпечення склала $\bar{P} = 0,34$. Ймовірність запуску резервного джерела енергопостачання складає $1 - \bar{P} = 0,66$.

Звісно, наведений підхід до оцінювання надійності роботи системи централізованого теплопостачання в надзвичайних умовах потребує розв'язання складного завдання щодо визначення коефіцієнтів імовірності з урахуванням особливостей конкретної системи, її структурних елементів, режимів експлуатації та можливих сценаріїв пошкоджень. Слід відзначити, що надійність окремих елементів системи може оцінюватися із застосуванням різних методів аналізу, що дозволяють отримати кількісні показники ризику виникнення відмов та забезпечити обґрунтовану оцінку загальної надійності системи [42].

2.4 Висновки до розділу 2

На основі дослідження можна зробити наступні висновки.

1. Наведено основні вимоги до сучасних систем теплопостачання з точки зору експлуатації. Визначено основні категорії споживачів електроенергії котелень.
2. Залежно від типу теплопостачального підприємства та характеру його обладнання, резервування можливе за рахунок власної електрогенерації, на базі двигунів внутрішнього згоряння, парових або газових турбін.
3. Найперспективнішим є резервування за рахунок вбудованої в основну схему генерації тепла, систему генерації електроенергії, тобто повної або часткової когенерації.

4. Для невеликих, зокрема й індивідуальних систем теплопостачання за максимального електроспоживання до 10 кВт можливе застосування недорогих автономних генераторів електроенергії на базі бензинових або дизельних генераторів. Однак, з огляду на високу вартість палива для таких генераторів, їхнє застосування доцільне тільки за відсутності зовнішнього електропостачання. І тому, як правило, більшу частину часу експлуатації котелень вони не діють.

5. Застосування газових турбін доцільне за великих потужностей електроспоживання в котельні теплогенеруючого підприємства, у котельнях із водогрійними котлами середньої потужності або для незалежного електропостачання теплогенеруючого комплексу з більш дрібних котелень.

6. Важливо зазначити, що при використанні в системі когенерації тепла та електроенергії газових турбін, доцільно використовувати агрегати з невисокою температурою до 800 °С та тиском газу перед турбіною до 0,8 МПа, які відрізняються високою надійністю, невисокою вартістю та забезпечують найбільший відпуск утилізованого тепла.

7. Слід оцінювати можливість зниження температури газу за котлом утилізатором менше 140 °С, звичайно при можливості забезпечити його надійну довготривалу експлуатацію.

8. Методом експертних оцінок визначено ймовірність відмови централізованого електрозабезпечення системи ТЗ, отриманий результат свідчить про рівень важливості впровадження резервної електрогенерації.

РОЗДІЛ 3. ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ РОБОТИ ДЖЕРЕЛ ЦЕНТРАЛІЗОВАНОГО ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ ЗА РАХУНОК ЗАСТОСУВАННЯ КОГЕНЕРАЦІЙНИХ УСТАНОВОК

3.1 Застосування когенераційних установок в системах централізованого теплопостачання

Забезпечення стабільного електропостачання опалювальних котелень в умовах відключення електроенергії – важливе технічне та економічне завдання. Знеструмлення опалювальних котелень спричиняє перебої у виробництві тепла для споживачів, розхолодження систем теплопостачання та вихід із ладу елементів технологічного процесу. Одним із напрямків вирішення поставлених питань може бути застосування когенераційних установок, які здатні забезпечувати об'єкти комунального господарства не лише теплотою, а також електричною енергією [81, 43, 53, 82].

Використання когенераційних установок (КУ) у якості надбудови у районних опалювальних котельнях має певне розповсюдження [77]. Основна мета такого застосування – автономне забезпечення потреб котельні в електриці та покращення економічних показників теплогенерації за рахунок використання утилізованого тепла КУ [83].

Реконструкція опалювальних котелень у міні-ТЕЦ електричною потужністю до 30 МВт, що розташовані у безпосередній близькості від кінцевого споживача, дозволяє не тільки забезпечувати електроенергією власні потреби котельні а й отримувати додатковий прибуток від її реалізації [53].

Отже, метою дослідження є розробка ефективних схемних рішень щодо впровадження когенераційних установок в існуючі мережі енергопостачання з урахуванням режимів споживання теплової та електричної енергії.

Для досягнення поставленої мети необхідно розробити схемні рішення щодо застосування когенераційних установок для сумісного видобутку теплоти та

електроенергії та провести аналіз ефективності впровадження запропонованих схемних рішень за відповідними критеріями.

Аналіз застосування КУ у якості надбудови опалювальних котелень [46] дозволяє визначити основні наступні варіанти схемних рішень:

– автономне застосування КУ задля власних потреб котельні в електриці з використанням утилізованого тепла КУ щодо теплозабезпечення споживачів сумісно з водогрійними котлами (рис. 3.1);

– підключення КУ до електромережі, що забезпечує електрикою не тільки власні потреби котельні, але й зовнішніх споживачів та значно збільшує частку утилізованого тепла в балансі системи тепlopостачання (рис. 3.2);

– забезпечення електрикою від КУ власних потреб котельні та додаткових джерел тепла (теплових насосів) щодо підвищення ефективності тепlopостачання та збільшення частки додаткового та утилізованого тепла в балансі системи тепlopостачання (рис. 3.3).

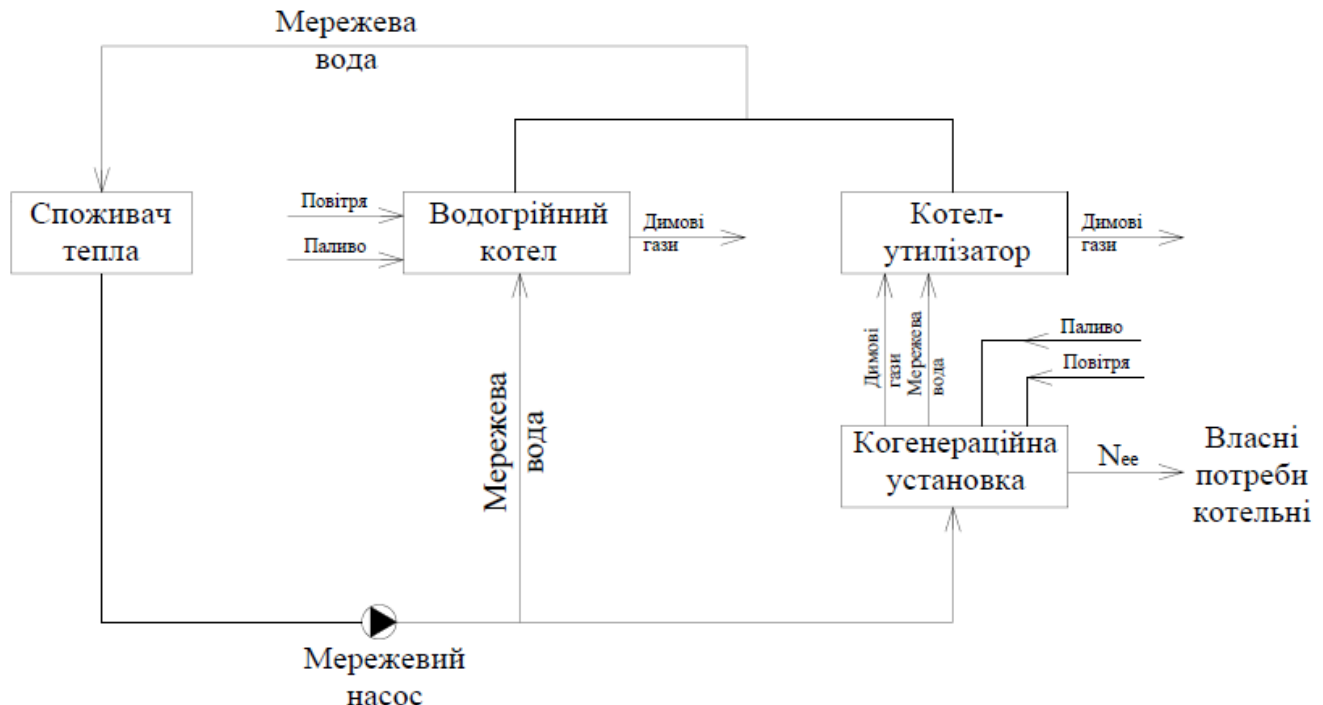


Рисунок 3.1 – Теплова схема енергозабезпечення котельні з когенераційною установкою в автономному режимі

КУ в автономному режимі (рис. 3.1) працює за електричним графіком навантажень, що визначається власними потребами котельні в електриці.

Аналіз енергетичного балансу таких систем показує, що для опалювальних котелень на кожні 100 Гкал/год встановленої теплової потужності в середньому приєднується 2 – 2,5 МВт електричної потужності на усі власні потреби [46]. Оскільки середнє теплове навантаження котельні складає 40–50 % від встановленої потужності (40 – 50 Гкал/год при встановлених 100 Гкал/год), то частка тепла від КУ в загальному тепловому балансі відповідно становитиме 5–8%. Подальше збільшення частки утилізованого тепла від КУ вимагає відповідного збільшення електричної потужності КУ та додаткових споживачів електрики.

За наведеною схемою (рис. 3.1), потік зворотної мережевої води розподіляється між водогрійним котлом (ВК) та КУ. Температура зворотної мережевої води на вході до КУ $t_{\text{ЗВ}}^{\text{КУ}} = 50 - 55^{\circ}\text{C}$. Першим ступенем підігріву води є система охолодження двигуна КУ, другим - теплообмінник-утилізатор газів від КУ. Підігрів води на першому ступені становить $5 - 10^{\circ}\text{C}$, на другому ступені – приблизно $5 - 7^{\circ}\text{C}$ і, таким чином, температура води на виході з КУ складатиме $t_{\text{ВВ}}^{\text{КУ}} = 70^{\circ}\text{C}$. ВК у схемі відіграє важливу роль, бо дозволяє здійснювати, за необхідності, підігрів води вище за 90°C .

Варіант теплової схеми з підключенням КУ до загальної електромережі (рис. 3.2), забезпечує електрикою не тільки власні потреби котельні, але й зовнішніх споживачів. КУ в такому режимі працює за тепловим графіком навантажень, що визначається потребами споживача з урахуванням тепла від ВК. При цьому електрична потужність когенераційної станції може перевищувати власні потреби котельні у 5 – 10 разів та складати, відповідно, 10 – 20 МВт (декілька газопоршневих КУ). Відповідно, частка тепла від КУ в загальному тепловому балансі системи може збільшуватися до 50 %. Така велика частка КУ в тепловому балансі сприяє високій енергетичній ефективності системи.

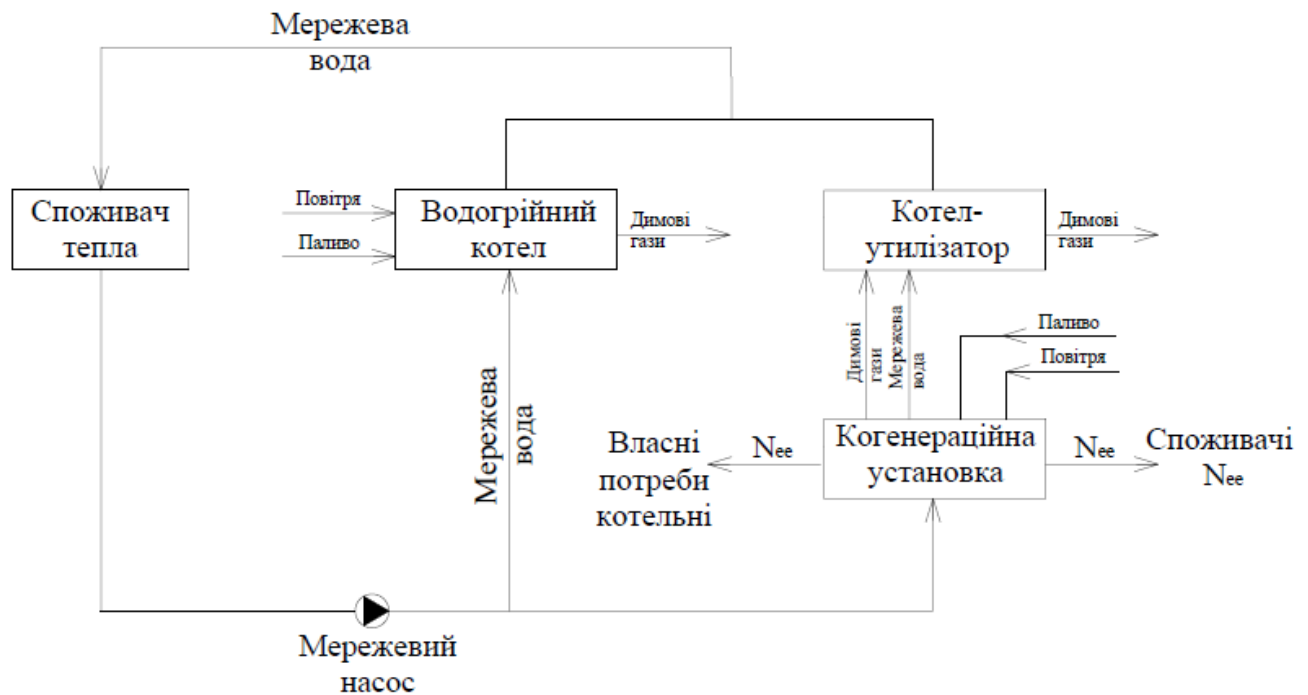


Рисунок 3.2 – Теплова схема енергозабезпечення котельні з підключенням КУ до електромережі

На рис. 3.3 представлено схему енергозабезпечення котельні з тепловим насосом (ТН) та когенераційною установкою [84]. ТН застосовується в якості додаткового джерела теплоти. При коефіцієнті перетворення ТН близько $COP = 3.0$ на кожен додатковий 1 МВт електричної потужності КУ можна отримати (з урахуванням утилізованого тепла КУ) в середньому 4,0 – 4,5 Гкал/год додаткової теплової потужності.

Тобто, при загальній електричній потужності КУ 5–7 МВт для котельні з середнім тепловим навантаженням 40 – 50 Гкал/год частка тепла, що надходить від КУ і ТН складатиме 16 – 25 Гкал/год (40-50 %), що матиме значний вплив на ефективність генерації теплоти при одночасній автономній генерації електрики для котельні.

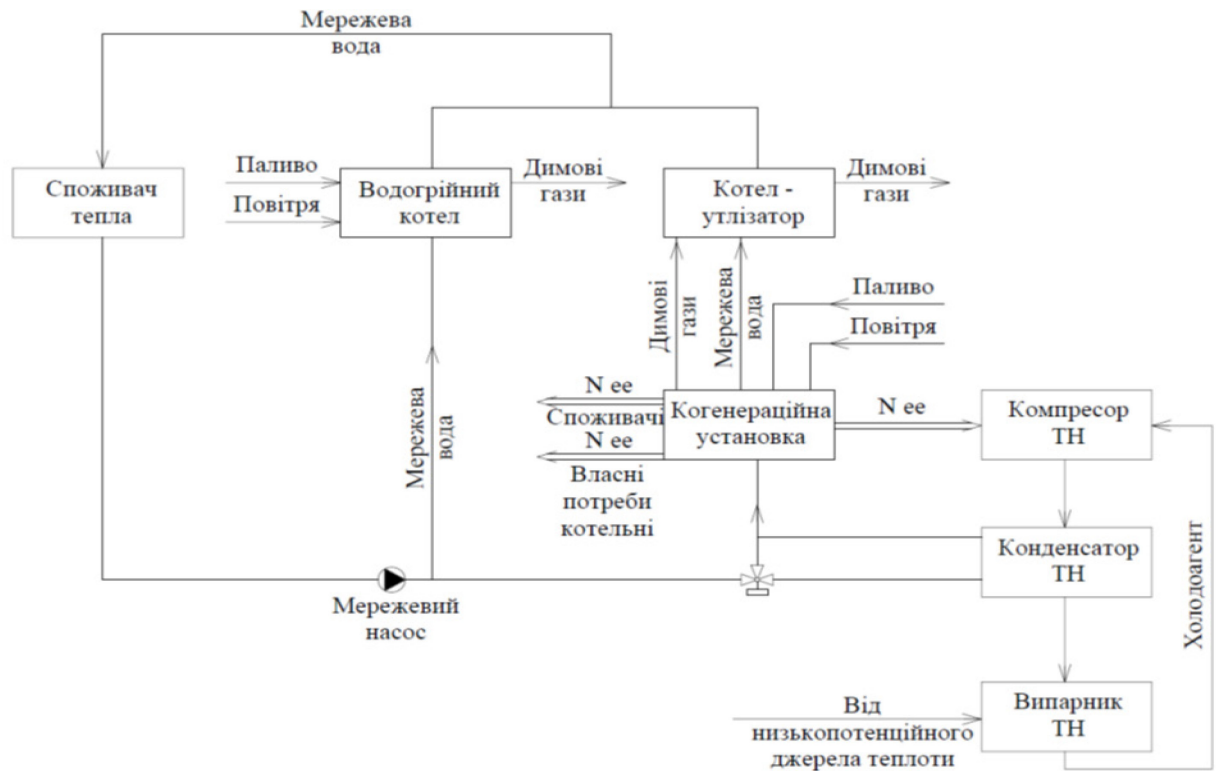


Рисунок 3.3 – Теплова схема системи енергозабезпечення котельні з тепловим насосом та когенераційною установкою

За наведеною схемою потік зворотної мережевої води розподіляється між ВК та додатковими джерелами тепла. Першим ступенем підігріву мережевої води є ТН, оскільки такий температурний режим сприяє його високій енергетичній ефективності. Температура зворотної мережевої води на вході до ТН – $t_{\text{ЗВ}}^{\text{ЗВ}} = 50 - 55 \text{ }^{\circ}\text{C}$, на виході $t_{\text{ТН}} = 60 - 65 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Другим ступенем підігріву є система охолодження двигуна КУ і теплообмінник-утилізатор газів від КУ. підігрів води у другому ступені складає приблизно $5 - 7 \text{ }^{\circ}\text{C}$ і таким чином температура води на виході з системи додаткових джерел тепла складатиме $t_{\text{МЕ}}^{\text{Дод}} = 70 \text{ }^{\circ}\text{C}$. ВК у схемі також дозволяє здійснювати, за необхідності, підігрів води вище за $90 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

3.2 Моделювання елементів системи теплопостачання та показники ефективності системи

3.2.1 Модель газопоршневого двигуна-генератора

Газопоршневі двигуни-генератори (ГДГ) - зазвичай складаються з наступних систем: охолоджувальної, механічної, паливно-повітряної, електро-технічної, газовиділення, мастильної. При моделюванні ГДГ в системах комбінованого енергозабезпечення математичну модель процесів в когенераційній установці доцільно обмежити математичним описом матеріальних та енергетичних та балансів, а також змінами цих балансів у відповідності до поточного навантаження ГДГ.

На рис. 3.4 наведеною схемо енергетичного балансу ГДГ, яка враховує:

– перетворення енергетичних потоків палива $Q_{пал}$ та повітря $Q_{пов}$ на вході до ГДГ в механічну потужність $N_{мех}$ з подальшим перетворенням її в електричну потужність ГДГ $N_{ел}$ на виході;

– утилізоване тепло системи охолодження мастила $Q_{ом}$, тепло системи охолодження двигуна $Q_{од}$, та теплову потужність охолодження турбонаддуву повітря $Q_{тн}$;

– втрати тепла поверхнею ГДГ до навкілля відповідно за рахунок конвекції $Q_{втр}^{кон}$ та випромінювання $Q_{втр}^{вип}$;

– втрати в електрогенераторі при перетворенні механічної потужності $N_{мех}$ в електричну потужність – $Q_{ген}$;

– утилізацію теплової потужності вихлопних газів ГДГ $Q_{вихл}$ котлом-утилізатором $Q_{ку}$ та відповідні втрати тепла з уходячими газами, $Q_{вид}$.

Остаточну рівняння енергетичного балансу когенераційної установки запишемо у вигляді:

$$Q_{пал} + Q_{пов} - (Q_{од} + Q_{ом} + Q_{тн} + Q_{ку}) - (Q_{вид} + Q_{втр}^{кон} + Q_{втр}^{вип} + Q_{ген}) - N_{ел} = 0$$

Тепловий потік палива визначатиметься його витратою $G_{нал}$ та нижчою тепловою величиною згоряння Q_H^p :

$$Q_{нал} = G_{нал} \cdot Q_H^p$$

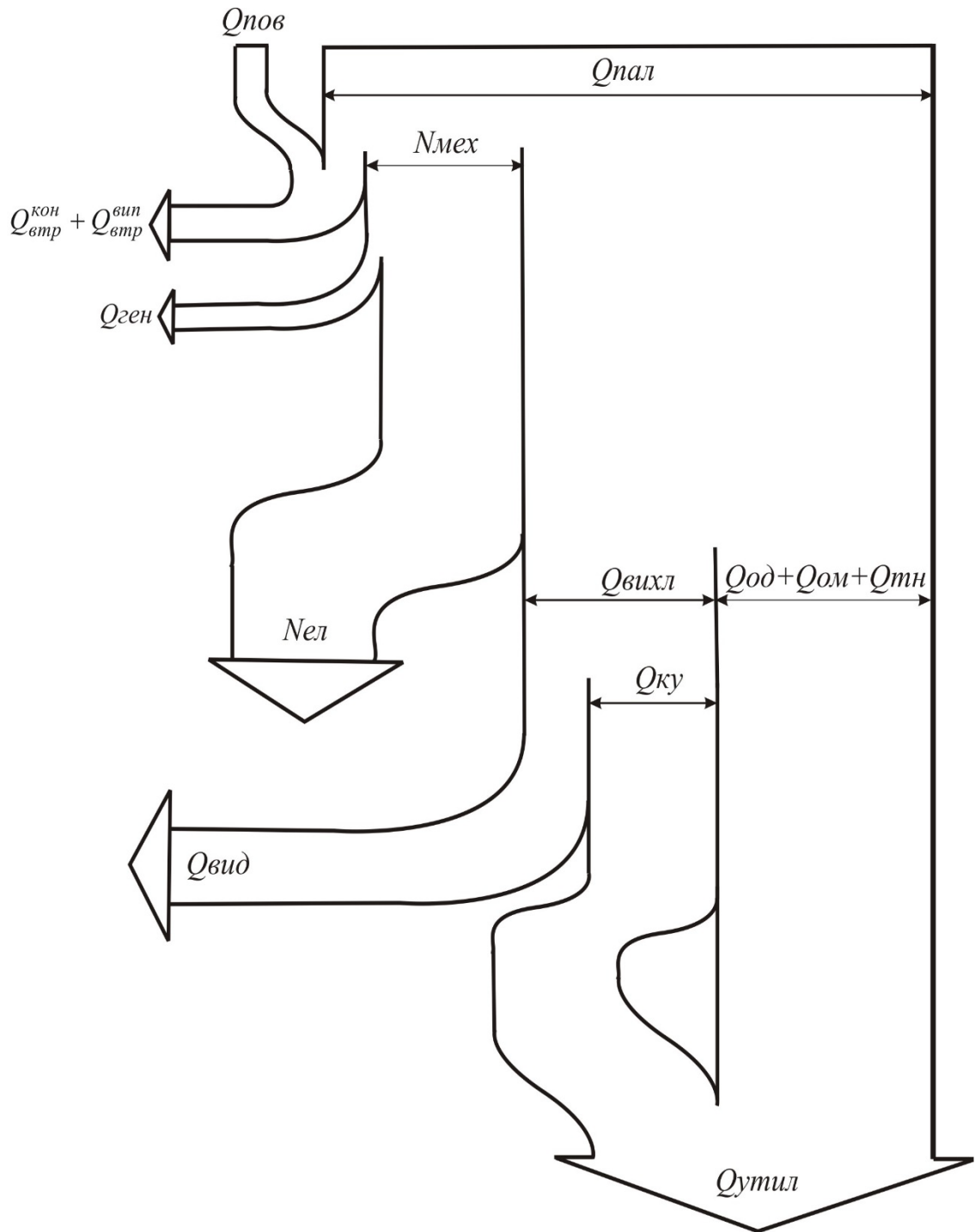


Рисунок 3.4 – Енергетичний баланс газопоршневої КУ

Тепловий потік повітря $Q_{\text{пов}}$ визначається за виразом:

$$Q_{\text{нов}} = G_{\text{нов}} \cdot c_{\text{нов}} \cdot t_{\text{нов}},$$

де $G_{\text{нов}}$ – витрата повітря, $\text{кг} / \text{с}$;

$t_{\text{нов}}$ – температура холодного повітря на вході до установки, $^{\circ}\text{C}$.

$c_{\text{нов}}$ – теплоємність повітря, $\text{кДж} / (\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C})$;

Механічна потужність установки $N_{\text{мех}}$ визначається за її механічним ККД

$\eta_{\text{м}}$:

$$N_{\text{мех}} = \eta_{\text{м}} \cdot Q_{\text{нал}}$$

Електрична потужність ГДГ $N_{\text{ел}}$ визначається за ККД електрогенератора

$\eta_{\text{г}}$:

$$N_{\text{ел}} = \eta_{\text{г}} \cdot N_{\text{мех}},$$

або:

$$N_{\text{ел}} = N_{\text{мех}} - Q_{\text{ген}}$$

Утилізоване тепло систем охолодження двигуна, турбонаддуву повітря та мастила використовується для підігріву мережевої води:

$$Q_{\text{од}} + Q_{\text{ом}} + Q_{\text{тн}} = G_{\text{мв}} \cdot c_{\text{мв}} \cdot (t_{\text{мв}}^{\text{вих}} - t_{\text{мв}}^{\text{вх}}),$$

де $t_{\text{мв}}^{\text{вих}}$, $t_{\text{мв}}^{\text{вх}}$ – відповідно температури мережевої води на виході та вході КУ, $^{\circ}\text{C}$;

$G_{мв}$ – витрата мережевої води, $кг/с$;

$c_{мв}$ – теплоємність мережевої води при заданій температурі, $кДж/(кг \cdot ^\circ C)$.

Тепло з вихлопними газами ГДГ $Q_{вихл}$ залежить від їх температури $t_{вихл}$, яка становить приблизно $400 - 450 ^\circ C$, від коефіцієнта надлишку повітря α та від виду палива:

$$Q_{вихл} = G_{нал} \cdot (h_{вихл} - \alpha \cdot h_{нов}),$$

де $h_{вихл}$ – ентальпія вихлопних газів при температурі $t_{вихл}$, $кДж/(м^3)$;

$h_{нов}$ – ентальпія холодного повітря при відповідній температурі навколишнього середовища $t_{нс}$, $кДж/(м^3)$.

Витрата палива $G_{нал}$ визначається за графіками електричного та теплового навантаження споживачів та коефіцієнтом використання тепла палива $\eta_{КВП}$ при поточному електричному та тепловому навантаженні ГДГ. Значення коефіцієнта надлишку повітря α визначатиметься за повнотою спалювання палива та мінімальними викидами шкідливих речовин.

Втрати тепла поверхні КУ є складною залежністю від геометрії та площі поверхні двигуна, його температурного поля, циркуляції і температури навколишнього середовища. Розрахунок величини втрат тепла потребує визначення множини початкових даних. Дослідження теплового балансу ГДГ [82] вказує на зворотну залежність відносних втрат тепла з поверхні КУ від її номінальної потужності $N_{ел}^{ном}$, що з достатньою точністю описується виразом:

$$Q_{втр}^{кон} + Q_{втр}^{вип} = 0,3 \cdot Q_{нал} / (N_{ел}^{ном})^{0,3}$$

Матеріальний баланс КУ визначається за системою рівнянь:

$$\begin{cases} G_{нал} + G_{нов} - G_{у2} = 0 \\ G_{мв} = G_{мв}^{вх} = G_{мв}^{вих} \end{cases},$$

де $G_{мв}^{вх}, G_{мв}^{вих}$ – відповідно витрата мережевої води на вході та виході КУ.

3.2.2 Моделювання роботи котла-утилізатора

Котли-утилізатори КУ призначені для утилізації тепла вихлопних газів, що на виході газопоршневого двигуна мають температуру до 350 – 450 °С та частка яких в тепловому балансі КУ сягає 30 % енергії палива на вході. При утилізації тепла втрати з вихлопними газами КУ знижуються до 6–8 %, а температура газів після котла-утилізатора складає 110 – 140 °С.

За конструктивним виконанням котли-утилізатори ГДГ є газотрубними водогрійними котлами дво- або триходовими по руху газів з примусовою циркуляцією мережевої води.

Моделювання котлів-утилізаторів, зазвичай, базується на складанні рівнянь трьох типів: рівнянні теплового балансу, рівнянні теплопередачі та конструктивних рівнянь [85].

Рівняння *теплового* балансу котла-утилізатора містить теплові потоки на вході та виході та втрати тепла через зовнішню поверхню:

$$Q_{газ}^{вх} - Q_{газ}^{вих} = Q_{мв}^{вих} - Q_{мв}^{вх} + Q_{втр}^{ку},$$

де $Q_{газ}^{вх}, Q_{газ}^{вих}$ – відповідно теплові потоки вихлопних газів на вході та виході котла-утилізатора, $кВт$;

$Q_{мв}^{вх}, Q_{мв}^{вих}$ – відповідно теплові потоки мережевої води на вході та виході котла-утилізатора, $кВт$;

$Q_{втр}^{ку}$ – втрати тепла скрізь зовнішню поверхню котла-утилізатора до навколишнього середовища, $кВт$.

Матеріальний баланс котла-утилізатора описується наступною системою рівнянь:

$$\begin{cases} G_{мв}^{вх} = G_{мв}^{вих} \\ G_{газ}^{вх} = G_{газ}^{вих} \end{cases},$$

де $G_{мв}^{вх}, G_{мв}^{вих}, G_{газ}^{вх}, G_{газ}^{вих}$ – відповідно витрати мережевої води та вихлопних газів на вході та виході котла-утилізатора, $кг/с$.

Значення поверхні теплообміну котла-утилізатора $F_{ку}$ визначається за результатами спільного рішення рівняння теплового балансу котла-утилізатора:

$$Q_{ку} = Q_{газ}^{вх} - Q_{газ}^{вих} = G_{газ} \cdot (h_{газ}^{вх} - h_{газ}^{вих}) \cdot \eta_{ку}$$

рівняння теплопередачі:

$$Q_m = Q_{мв}^{вих} - Q_{мв}^{вх} = k_{ку} \cdot \Delta t_{ку} \cdot F_{ку}$$

і визначається виразом:

$$F_{ку} = \frac{G_{газ} \cdot (h_{газ}^{вх} - h_{газ}^{вих}) \cdot \eta_{ку}}{k_{ку} \cdot \Delta t_{ку}},$$

де $h_{газ}^{вх}, h_{газ}^{вих}$ – відповідно ентальпії вихлопних газів на вході та виході котла, $кДж/кг$;

$\eta_{ку}$ – тепловий ККД котла-утилізатора, що враховує втрати тепла до навколишнього середовища;

$k_{ку}$ – коефіцієнт теплопередачі продуктів згоряння до мережевої води, що визначається за методикою [86], $Вт/(м^2 \cdot ^\circ C)$;

$\Delta t_{\text{ку}}$ – температурний напір, що залежить від схеми взаємного руху теплоносіїв у котлі [87], $^{\circ}\text{C}$.

Модель доповнюється рівняннями щодо розрахунку кількості та конструкції елементів котла-утилізатора відповідно до обраного типу [88].

3.2.3 Моделювання роботи теплового насоса

Модель теплового насоса, що є додатковим джерелом тепла в системі централізованого тепlopостачання з КУ (рис. 3.5), складається з конденсатора, випарника, компресора та дросельного вентиля.

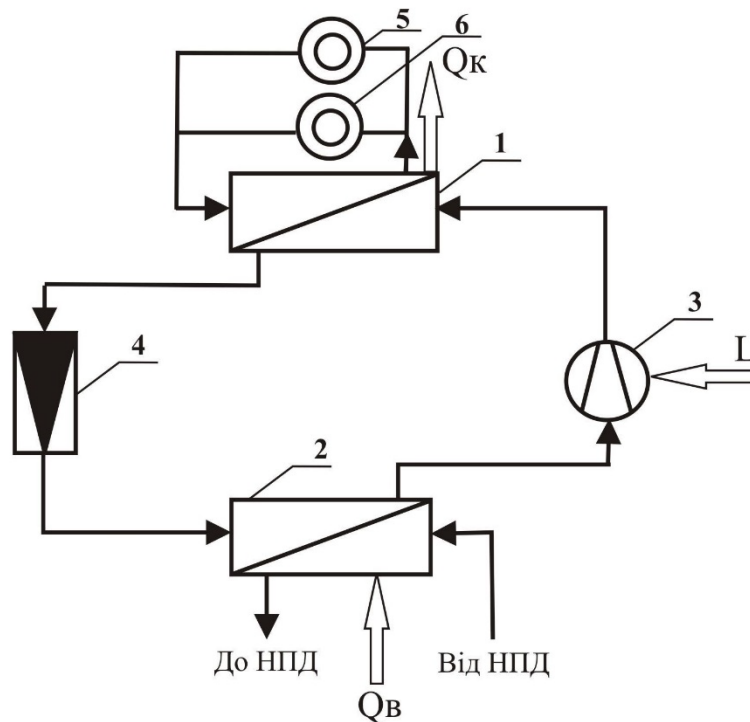


Рисунок 3.5 – Схема моделі теплового насоса:

- 1 – конденсатор ТН; 2 – випарник ТН, 3 – компресор; 4 – дросельний вентиль;
5 – споживач ГВП; 6 – споживач опалювання

Особливістю приєднання ТН до теплової схеми КУ є наявність варіантів використання тепла, яке відводиться від конденсатора Q_k , а далі з потоком мережевої води може бути спрямоване:

- до споживача на опалювання;

– до системи охолодження котла-утилізатора КУ та охолодження двигуна ГДГ для відповідного підвищення рівня температури мережевої води для споживання на опалювання.

Тепло до випарника ТН підводиться від відповідного низькопотенційного джерела тепла (НПДТ). Для кліматичних умов України НПДТ, зазвичай, може бути: тепло зовнішнього повітря, ґрунту, різних водойм, промислових стоків, скидних вод, тощо [89].

Після випарника холодоагент прямує до компресора ТН, де стискається, що потребує витрати роботи L , яка відбирається як частка електричної або механічної енергії від КУ.

У відповідності з 1-м законом термодинаміки, ефективність роботи ТН оцінюється за значенням коефіцієнту перетворення $COP = Q_k / L$ [90]. Робота стиснення у компресорі, відповідно, визначається різницею між теплом, що відводиться у конденсаторі (високотемпературний рівень) та тепла, що підводиться до випарника (низькотемпературний рівень): $L = Q_k - Q_v$.

Для незворотного циклу коефіцієнт перетворення ТН COP визначається виразом [91]:

$$COP = v \cdot COP_K = v \cdot T_k / (T_k - T_v), \quad (3.1)$$

де v – ступінь термодинамічної досконалості реального циклу;

T_k – температура холодоагенту в конденсаторі, K ;

T_v – температура холодоагенту у випарнику, K ;

COP_K – коефіцієнт перетворення ТН еквівалентного циклу Карно.

Температурний напір у конденсаторі ΔT_k визначається за різницею температур між температурою холодоагенту в ньому та середньою температурою мережевої води T_m^{cp} , яка надходить у конденсатор від споживача:

$$\Delta T_{\kappa} = T_{\kappa} - T_m^{cp}, \quad (3.2)$$

де $T_m^{cp} = (T_m^{вих} - T_m^{ex}) / \ln(T_m^{вих} / T_m^{ex})$ – середньологарифмічна температура мережевої води процесу відведення тепла від холодоагенту в конденсаторі ТН, К ,

де $T_m^{ex}, T_m^{вих}$ – відповідно температури мережевої води на вході та виході конденсатора, К .

Температурний напір для випарника ΔT_{ϵ} визначається за різницею середньої температури теплоносія $T_{НПД}^{cp}$, що циркулює у контурі НПД та температурою холодоагенту у випарнику:

$$\Delta T_{\epsilon} = T_{НПД}^{cp} - T_{\epsilon},$$

де $T_{НПД}^{cp} = (T_{НПД}^{ex} - T_{НПД}^{вих}) / \ln(T_{НПД}^{ex} / T_{НПД}^{вих})$ – середньологарифмічна температура теплоносія у контурі НПД при підведенні тепла до холодоагенту у випарнику ТН, К ,

де $T_{НПД}^{ex}, T_{НПД}^{вих}$ – відповідно температура середовища НПД на вході та виході випарника, К .

Коефіцієнт перетворення ТН COP з урахуванням виразів (3.1)–(3.2) можна представити як функцію температурного напору в конденсаторі ΔT_{κ} та випарнику ΔT_{ϵ} :

$$COP = v \cdot (\Delta T_{\kappa} + T_m^{cp}) / (\Delta T_{\kappa} + T_m^{cp} + \Delta T_{\epsilon} - T_{НПД}^{cp}).$$

Матеріальний баланс ТН описуємо системою рівнянь:

$$\begin{cases} G_m^{ex} = G_m^{вих} \\ G_{НПД}^{ex} = G_{НПД}^{вих} \end{cases},$$

де G_m^{ex} , $G_m^{вих}$, $G_{НПД}^{ex}$, $G_{НПД}^{вих}$ – відповідно витрати холодоагенту в конденсаторі ТН та теплоносія НПД скрізь випарник на вході та виході.

3.2.4 Показники ефективності систем централізованого теплопостачання з надбудовою котла утилізатора

Порівняльний аналіз енергетичної ефективності запропонованих схемних рішень централізованого теплопостачання з надбудовою КУ пропонується здійснювати за величиною коефіцієнта використання теплоти палива $\eta_{КВП}$, який зазвичай застосовується при оцінюванні ефективності КУ [84, 92]:

$$\eta_{КВП} = \frac{E + Q_T}{B \cdot Q_H^P},$$

де E , Q_T – відповідно електрична та теплова потужність КУ;
 B – витрата палива (газу) на КУ;
 Q_H^P – теплота спалювання газу.

Розглянемо показники енергетичної ефективності систем з КУ за трьома варіантами конфігурацій:

1. Звичайна конфігурація котельні без КУ – теплопостачання споживачів забезпечується тільки від ВК, приєднана електрична потужність котельні – від зовнішньої електромережі (ТЕС);
2. Теплопостачання споживачів – від ВК, надбудова з КУ для автономного забезпечення потреб котельні в електриці з утилізацією тепла КУ (рис. 3.1) або приєднання КУ до загальної електромережі (рис. 3.2);
3. Запропонована в роботі конфігурація з підключенням до КУ додаткового джерела тепла – ТН (рис. 3.3).

Відповідно до кожного варіанту вираз щодо визначення $\eta_{\text{КВП}}$ буде мати вигляд [83, 84]:

$$1. \quad \eta_{\text{КВП}}^1 = \frac{Q_{\text{ВК}} + N_{\text{пр}}}{B \cdot Q_{\text{H}}^{\text{P}} + \frac{N_{\text{пр}}}{\eta_{\text{ТЕС}}}}, \quad (3.3)$$

де $Q_{\text{ВК}}$ – теплова потужність ВК;

$N_{\text{пр}}$ – приєднана електрична потужність на загальні потреби котельні;

$\eta_{\text{ТЕС}}$ – електричний ККД ТЕС, на якій генерується електрика з урахуванням втрат на транспортування;

$$2. \quad \eta_{\text{КВП}}^2 = \frac{Q_{\text{ВК}} + N_{\text{КУ}}^{\text{K}} + Q_{\text{КУ}}}{(B_{\text{ВК}} + B_{\text{КУ}}) \cdot Q_{\text{H}}^{\text{P}}}, \quad (3.4)$$

де $N_{\text{КУ}}^{\text{K}}, Q_{\text{КУ}}$ – відповідно електрична та теплова потужність КУ;

$B_{\text{ВК}}, B_{\text{КУ}}$ – відповідно витрата палива (газу) на ВК та КУ;

$$3. \quad \eta_{\text{КВП}}^3 = \frac{Q_{\text{ВК}} + N_{\text{КУ}}^{\text{K}} + N_{\text{КУ}}^{\text{ТН}} \cdot \text{COP} + Q_{\text{КУ}}}{(B_{\text{ВК}} + B_{\text{КУ}}) \cdot Q_{\text{H}}^{\text{P}}}, \quad (3.5)$$

де $N_{\text{КУ}}^{\text{K}}, N_{\text{КУ}}^{\text{ТН}}$ – відповідно частки електричної потужності КУ для власних потреб котельні та живлення ТН;

COP – коефіцієнт перетворення ТН.

Для комбінованих систем енергозабезпечення (КСЕ), що характеризуються використанням додаткових джерел тепла на вході в систему і наявністю декількох енергетичних продуктів на виході E_i , оцінку ефективності пропонується здійснити за допомогою ККД системи за методом енергетичного балансу, що визначається виразом [91]:

$$\eta_{\text{КСЕ}} = \frac{\sum E_i}{\sum \Pi_i}, \quad (3.6)$$

де Π_i -й енергетичний потік на вході в систему – органічне паливо або інший організований потік енергії.

Відповідно до варіантів конфігурації системи, що розглянуто вище, вираз (3.4) матиме вигляд:

$$1. \quad \eta_{\text{КСЕ}}^1 = \frac{Q_{\text{ВК}} + N_{\text{пр}}}{B \cdot Q_{\text{Н}}^{\text{Р}} + \frac{N_{\text{пр}}}{\eta_{\text{ТЕС}}}}, \quad (3.7)$$

$$2. \quad \eta_{\text{КСЕ}}^2 = \frac{Q_{\text{ВК}} + N_{\text{КУ}}^{\text{К}} + Q_{\text{КУ}}}{(B_{\text{ВК}} + B_{\text{КУ}}) \cdot Q_{\text{Н}}^{\text{Р}}}, \quad (3.8)$$

$$3. \quad \eta_{\text{КСЕ}}^3 = \frac{Q_{\text{ВК}} + N_{\text{КУ}}^{\text{К}} + N_{\text{КУ}}^{\text{ТН}} \cdot \text{COP} + Q_{\text{КУ}}}{(B_{\text{ВК}} + B_{\text{КУ}}) \cdot Q_{\text{Н}}^{\text{Р}} + Q_{\text{НПД}}}, \quad (3.9)$$

де $Q_{\text{НПД}}$ – тепло від низькопотенційного джерела енергії (НПД) для ТН.

Вирази (3.7), (3.8) за структурою співпадають з виразами (3.4), (3.5), а вираз (3.9) додатково враховує тепловий потік від НПД до теплового насосу.

Наведені критерії оцінки ефективності систем централізованого теплопостачання з надбудовою КУ було використано при моделюванні режимів роботи різних варіантів наведених конфігурацій комбінованих систем енергозабезпечення КСЕ.

3.3 Узгодження графіків електричного і теплового навантаження комбінованої системи енергозабезпечення

3.3.1 Узгодження графіків електричного і теплового навантаження КСЕ при автономній роботі КУ

Автономна робота КСЕ відповідає режиму експлуатації КУ за електричним графіком навантаження, при якому виконується умова рівності миттєвих значень споживаної та генеруємої в системі електричних потужностей

$$N^{спож}(\tau) = N^{ген}(\tau). \quad (3.10)$$

Задачу узгодження графіків електричного та теплового навантажень розглянемо для найбільш характерного режиму роботи КСЕ, при якому теплове навантаження споживача сорозмірне з кількістю утилізованого тепла КУ та додаткових джерел тепла – ВК, або ВК і ТН одночасно.

$$Q^{спож}(\tau) \approx Q^{ум}(\tau) + Q^{доод}(\tau). \quad (3.11)$$

При нерівності лівої та правої частин виразу (3.10), відповідно, виникає небаланс тепла в системі, величина якого за проміжок часу з τ_0 до поточного моменту $\tau_{ном}$ буде складати:

$$\Delta Q_{\tau_0, \tau_{ном}} = \int_{\tau_0}^{\tau_{ном}} [Q^{ум}(\tau) + Q^{доод}(\tau) - Q^{спож}(\tau)] \cdot d\tau \quad (3.12)$$

При позитивному значенні небалансу ($\Delta Q_{\tau_0, \tau_{ном}} > 0$) відбувається підвищення температури мережевої води на виході $t_{мв}^{вих}(\tau)$ та вході $t_{мв}^{вх}(\tau)$ КУ, що може

привести до перегріву двигуна ГДГ та відповідного порушення температурного графіка споживача тепла.

При негативному значенні небалансу ($\Delta Q_{\tau_0, \tau_{nom}} < 0$) відбувається відповідне зниження температури мережевої води, що викликає дефіцит теплової потужності в системі.

Миттєве значення теплової утилізованої потужності однозначно визначається поточним значенням електричної потужності $Q^{ym}(\tau) = f(N^{gen}(\tau))$, що генерується, яке, у свою чергу, визначається електричним графіком навантаження споживача (рівняння (3.10)).

При конфігурації КСЕ за 1-м варіантом (рис. 3.1) у якості додаткового джерела тепла розглядається ВК, теплова потужність якого $Q^{дод}(\tau)$ в декілька разів перевищує утилізоване тепло від КУ $Q^{ут}(\tau)$, тому, за рахунок регулювання навантаження ВК, повністю компенсується виникаючий небаланс в системі та узгоджується електричне і теплове навантаження КУ.

Для КСЕ, де додатковим джерелом тепла є ТН (рис. 3.3), для компенсації небалансу тепла $\Delta Q_{\tau_0, \tau_{nom}}$ в системі, відповідно до рівняння теплового балансу ТН:

$$t_{ТН}^{вих} = t_{ТН}^{вх} + (COP \cdot N_{комп}) / (c_{мв} \cdot G_{мв}^{ТН}),$$

де $N_{комп}$ – електрична потужність компресора ТН;

$c_{мв}$ – теплоємність мережевої води;

$G_{мв}^{ТН}$ – витрата мережевої води, що подається на ТН.

Регулювання температури теплоносія на виході конденсатора ТН $t_{ТН}^{вих}$ здійснюється за рахунок зміни продуктивності компресора ТН $N_{комп}$, яка, у свою чергу, визначає величину $Q^{ym}(\tau)$. Теплова потужність ВК порівнянна з утилізованим теп-

лом від КУ $Q^{yt}(\tau)$ і тепловою потужністю ТН $Q^{TH}(\tau)$, тому регулювання навантаження ВК у поєднанні з регулюванням навантаження ТН компенсує дисбаланс, що виникає в системі, та узгоджує електричне й теплове навантаження КУ.

3.3.2 Узгодження графіків електричного і теплового навантаження КСЕ при синхронізації КУ з енергомережою

Робота КСЕ при синхронізації КУ з енергомережою (рис.3.2) відповідає режиму експлуатації установки за тепловим графіком навантаження, при якому виконується умова рівності теплового навантаження споживача кількості утилізованого тепла від когенераційної установки та додатково одержаного тепла від ВК:

$$Q^{спож}(\tau) = Q^{ym}(\tau) + Q^{доп}(\tau).$$

Миттєве значення небалансу споживаної та генеруємої електричної потужності $\Delta N(\tau) = N^{спож}(\tau) - N^{ген}(\tau)$ може компенсуватися подачею надлишкової електричної потужності до системи:

$$N^{спож}(\tau) = N^{ген}(\tau) \pm \Delta N(\tau).$$

Наявність додаткового джерела тепла – ВК розширює можливості щодо зміни теплового навантаження системи відповідно графіка теплового споживання.

3.4 Результати моделювання режимів навантаження систем централізованого теплопостачання з надбудовою КУ

3.4.1 Вхідні дані щодо моделювання КСЕ

У якості вхідних даних щодо моделювання КСЕ було використано реальний проєкт реконструкції районної котельні «Південна-1» комунального підприємства «Теплопостачання м. Одеса» з надбудовою від 1 до 5 газопоршневих КУ австрій-

ської фірми Jenbacher типу JMS 620 GS-N.L [80]. Котельня забезпечує опалення та гаряче водопостачання житлових будинків, адміністративних будівель та виробничих приміщень Київського району м. Одеса.

Технічні характеристики районної котельні «Південна-1».

На котельні встановлено чотири котлоагрегати типу ПТВМ-50, що є основним джерелом теплопостачання для підігріву води до 70 – 150 °С.

Експлуатаційні характеристики котлоагрегату ПТВМ-50:

Тип котла - водопідігрівач;

Теплопродуктивність, Гкал/год – 50;

Теплопродуктивність, МВт – 58,2;

Температурний режим, °С – 70-150 °С;

Розрахунковий ККД, % – 91;

Витрата палива (газу), м³/год – 6250.

При моделюванні змінних режимів навантаження обладнання котельні були використані відповідні дані з режимних карт котлоагрегатів [93].

За проєктом реконструкції котельні щодо підвищення ефективності та надійності роботи систем централізованого теплопостачання передбачено встановлення від 1 до 5 газопоршневих КУ австрійської фірми Jenbacher типу JMS 620 GS-N.L. (рис. 3.6).

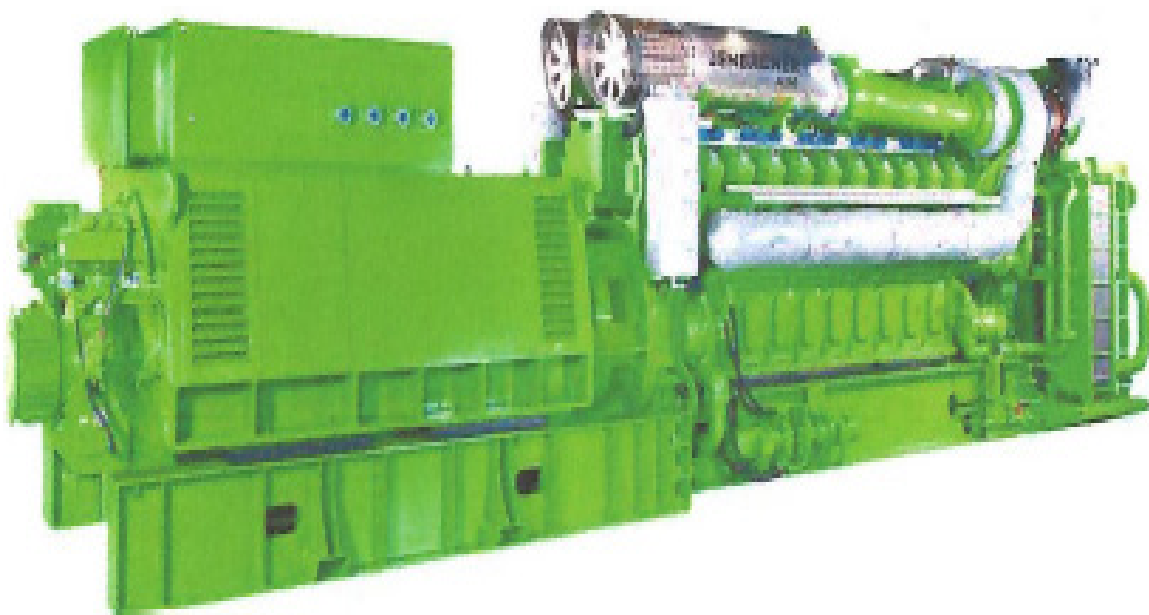


Рисунок 3.6 – Когенераційна установка австрійської фірми Jenbacher типу JMS 620 GS-N.L

Технічні характеристики КУ Jenbacher JMS 620 GS-N.L представлено в табл. 3.1. [94].

Таблиця 3.1 – Технічні характеристики КУ Jenbacher JMS 620 GS-N.L

Навантаження, %		50	75	100
Параметр	Один. виміру			
Витрата газу	нм ³ /год	433	616	799
Електрична потужність	кВт	1659	2502	3352
Теплова потужність	кВт	2006	2759	3531
Електричний ККД	%	40,3	42,9	44,1
Тепловий ККД	%	48,8	47,1	46,5
Загальний ККД	%	90,6	90,0	89,1

Середньомісячне теплове та електричне навантаження районної котельні "Південна -1" за 2023 р. представлено у табл. 3.2.

Аналіз даних табл. 3.2. показує, що відношення споживання електроенергії до відпуску тепла котельні "Південна-1" лежить в межах 40 – 50 кВт/Гкал, що є середнім значенням для багатьох районних опалювальних котелень України [46]. Найбільше споживання електрики на власні потреби котельні – у січні, а найбільший відпуск тепла котельні – у грудні. Щодобове теплове та електричне навантаження районної котельні "Південна-1" за січень 2023 р. представлено у табл. 3.3

[illegible]

Аналіз даних табл. 3.3 показує, що середньогодинне теплове навантаження котельні у січні 2023 р. було в межах 25 – 35 Гкал/год, що відповідає навантаженню тільки 1 котла ПТВМ-50. Середня температура зовнішнього повітря за січень 2023 р. склала $+3\text{ }^{\circ}\text{C}$, мінімальна $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ [95], що свідчить про доволі теплу погоду у січні 2023 р. Моделювання режимів навантаження системи теплопостачання з надбудовою КУ було здійснено у всьому розрахунковому діапазоні температури зовнішнього повітря від $+8\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$. При цьому відпуск тепла здійснювали від 1 до 3 котлів ПТВМ-50.

3.4.2 Результати моделювання режимів навантаження систем теплопостачання з надбудовою КУ

Моделювання режимів навантаження систем теплопостачання з надбудовою КУ було виконано на підставі наведених вище математичних моделей елементів системи з використанням вхідних технічних параметрів обладнання та експериментальних даних щодо режимів навантаження котельні.

Оцінювання ефективності розглянутих варіантів конфігурації системи виконано за використанням критеріїв:

- коефіцієнта використання теплоти палива $\eta_{\text{КВП}}$ (вирази (3.3)–(3.5));
- ККД системи за методом енергетичного балансу $\eta_{\text{КСЕ}}$ (вирази (3.6)–(3.8)).

На рис. 3.7 наведено залежність коефіцієнта використання теплоти палива $\eta_{\text{КВП}}$ систем теплопостачання з надбудовою КУ різних конфігурацій від температури зовнішнього повітря $t_{\text{зн}}$ при автономній роботі КУ без приєднання до електричної мережі.

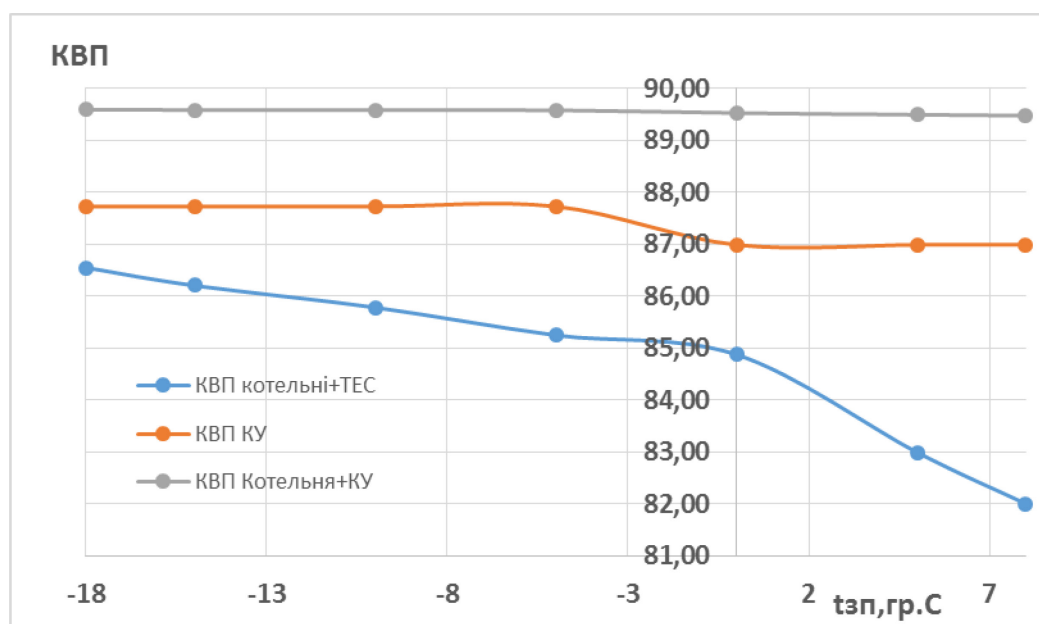


Рисунок 3.7 – Залежність коефіцієнта використання теплоти палива $\eta_{\text{КВП}}$ від температури зовнішнього повітря $t_{\text{зн}}$ при автономній роботі КУ

Найменше значення $\eta_{\text{КВП}}$ характерно для роздільної генерації тепла та електрики, що постачається від зовнішньої ТЕС. Значення $\eta_{\text{КВП}}$ нижче при збільшенні температури зовнішнього повітря, тобто при цьому зменшується співвідношення відпуску тепла до споживаної електрики, а ККД котельні та ТЕС, з урахуванням втрат на транспортування, відповідно, дорівнює 0,9 та 0,3.

Значення $\eta_{\text{КВП}}$ КУ змінюється в межах 87 – 88 %, та зростає при збільшенні теплового та, відповідно, електричного навантаження котельні зі зменшенням температури зовнішнього повітря.

Коефіцієнт використання теплоти палива $\eta_{\text{КВП}}$ системи теплопостачання з надбудовою КУ досягає значення 89,5 – 89,6 %, що вказує на вищу енергетичну ефективність системи в порівнянні з роздільною генерацією.

На рис. 3.8 наведено залежність коефіцієнта використання теплоти палива $\eta_{\text{КВП}}$ систем теплопостачання з надбудовою КУ різних конфігурацій від температури зовнішнього повітря $t_{\text{зн}}$ при приєднанні КУ до електричної мережі.

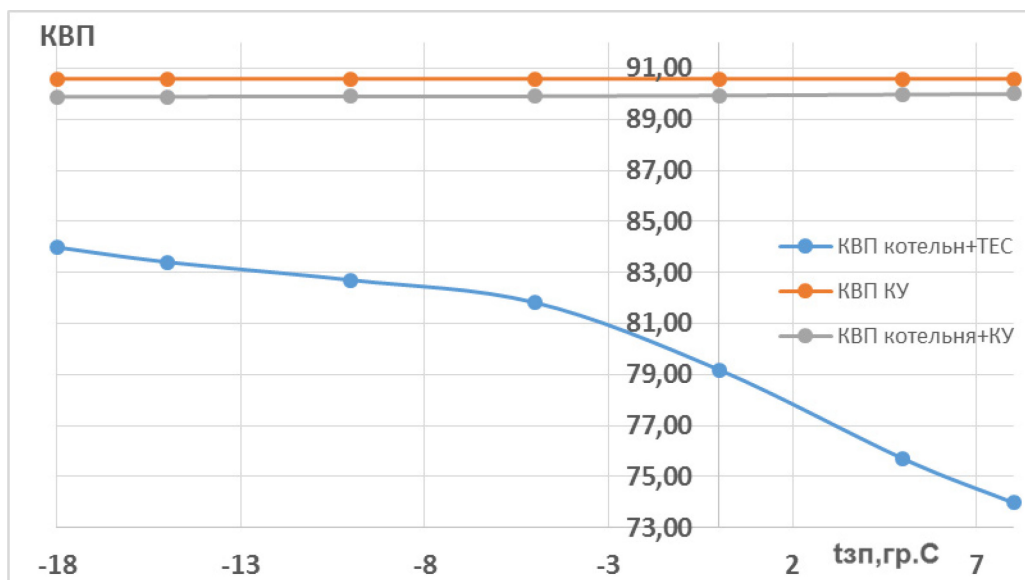


Рисунок 3.8 – Залежність коефіцієнта використання теплоти палива $\eta_{\text{КВП}}$ від температури зовнішнього повітря $t_{\text{зн}}$ при приєднанні КУ до електричної мережі

Найменше значення $\eta_{\text{КВП}}$ також характерно для роздільної генерації тепла від котельні та електрики, що постачається від зовнішньої ТЕС.

Значення $\eta_{\text{КВП}}$ КУ знаходиться на рівні близько 90,6 %, чому сприяє максимальне електричне та теплове навантаження КУ, тому що надлишки електрики від КУ передаються до загальної електромережі.

Коефіцієнт використання теплоти палива $\eta_{\text{КВП}}$ системи тепlopостачання з надбудовою КУ досягає значення близько 90 %, що приблизно на 0,5 % вище порівняно з автономною роботою КУ завдяки підвищенню енергетичної ефективності КУ при максимальному навантаженні.

Результати дослідження енергетичної ефективності систем тепlopостачання різних конфігурацій за значенням коефіцієнта використання теплоти палива $\eta_{\text{КВП}}$ при змінних навантаженнях наведено на рис. 3.9

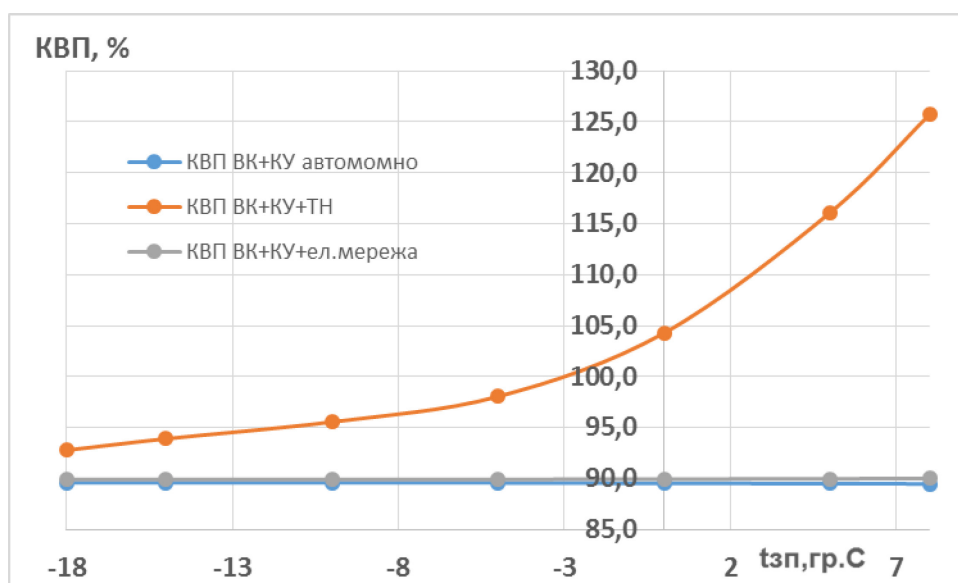


Рисунок 3.9 – Енергетична ефективність систем теплопостачання різних конфігурацій за значенням коефіцієнта використання теплоти палива $\eta_{\text{КВП}}$ при змінних навантаженнях

Аналіз рис. 3.9 показує, що енергетична ефективність за значенням $\eta_{\text{КВП}}$ варіантів систем теплопостачання з надбудовою при роботі КУ в автономному режимі та при приєднанні КУ до загальної електромережі сорозмірна, та знаходиться на рівні 89,5 – 90,0 %.

При дослідженні конфігурації системи теплопостачання з додатковим джерелом тепла (ТН) когенераційна станція складалась з 2-х КУ. Перша КУ використовувалася для забезпечення власних потреб котельні у електриці, друга – для живлення електродвигуна компресора ТН. Утилізоване тепло від обох КУ спрямовується у систему теплопостачання.

Енергетична ефективність системи з додатковим джерелом тепла (ТН та КУ) за значенням $\eta_{\text{КВП}}$ значно вище за попередні, та знаходиться в межах 93–126 %. Отриманий результат $\eta_{\text{КВП}}$, що більше за 1,0, має умовний характер для порівняння варіантів, тому що при розрахунках в тепловому балансі палива не враховувалось тепло від зовнішнього низькопотенційного джерела енергії на вході до випарника ТН, бо воно не є органічним паливом для генерації тепла.

Енергетична ефективність конфігурації системи з додатковим джерелом тепла значно залежить від температури зовнішнього повітря t_{zn} , що пояснюється суттєвою зміною ефективності ТН (COP) при зміні t_{zn} від $+8\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ та відповідним підвищенням температури зворотної мережевої води $t_{зв}$ на вході до конденсатора ТН, що також знижує значення COP ТН.

Зміна температури зовнішнього повітря t_{zn} від $+8\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ також значно впливає на енергетичний баланс системи теплопостачання з додатковими джерелами тепла (рис 3.10).

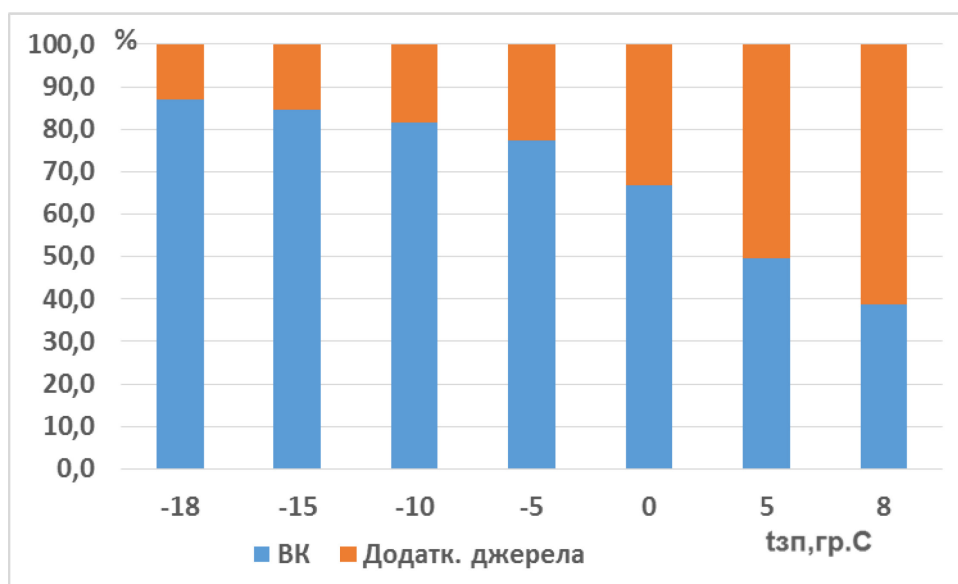


Рисунок 3.10 – Залежність частки тепла додаткових джерел в енергетичному балансі котельні від температури зовнішнього повітря t_{zn}

При зміні температури зовнішнього повітря t_{zn} від $+8\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ частка тепла від БК відповідно збільшується від 39 % до 87 %, а частка тепла від додаткових джерел (ТН та утилізоване тепло КУ) зменшується від 61 % до 13 %, тобто у декілька разів. У найбільш вірогідних межах температури t_{zn} від $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ співвідношення тепла від БК та додаткових джерел змінюється від 50/50 % до 77/23 %.

Результати дослідження ККД систем теплопостачання різних конфігурацій за методом енергетичного балансу $\eta_{КСЕ}$ при змінних навантаженнях представлено на рис. 3.11.

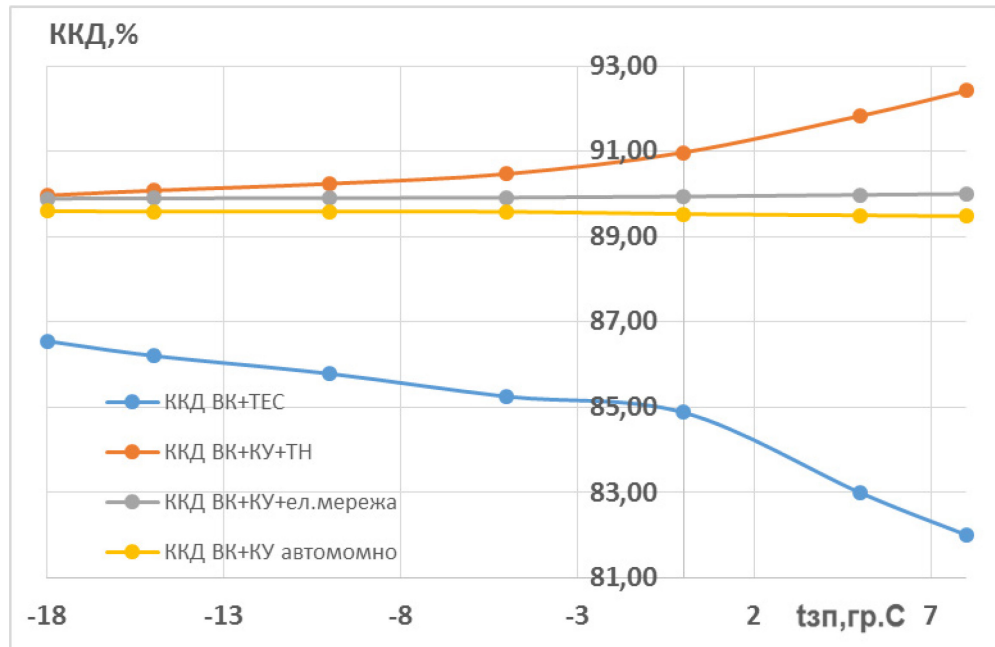


Рисунок 3.11 – Енергетична ефективність систем теплопостачання різних конфігурацій за методом енергетичного балансу

$\eta_{КСЕ}$ при змінних навантаженнях

Аналіз рис. 3.11 показує, що найменша енергетична ефективність системи за значенням $\eta_{КСЕ}$ на рівні 82 – 86,5 % характерна для роздільної генерації котельні і ТЕС.

Для конфігурації котельня з надбудовою КУ в автономному режимі значення $\eta_{КВП}$ досягає рівня 89,5 – 90,0 %, що свідчить про перевагу використання КУ у якості надбудови щодо енергетичної ефективності [96].

Енергетична ефективність конфігурації системи з додатковими джерелами тепла за значенням $\eta_{КСЕ}$ значно вище (90 – 92,4 %), що також підтверджує переваги запропонованої конфігурації за різними критеріями енергетичної ефективності.

Значення $\eta_{\text{КСЕ}}$ за методом енергетичного балансу не перевищує 1.0, оскільки за цим методом враховуються усі енергетичні потоки на вході до системи, а не лише органічне паливо.

3.5 Висновки до розділу 3

1. Проведено аналіз підходів щодо підвищення надійності систем централізованого теплопостачання в умовах відключення електроенергії для районної опалювальної котельні з використанням когенераційних та теплонасосних технологій.
2. Запропоновано схемні рішення застосування когенераційних установок для сумісного видобутку теплоти та електроенергії:
 - автономне застосування КУ задля власних потреб котельні в електриці;
 - з підключенням КУ до електромережі;
 - забезпеченням електрикою від КУ власних потреб котельні та додаткових джерел тепла (теплових насосів).
3. Розроблено математичну модель системи енергозабезпечення на базі газопоршневої когенераційної установки та моделі основних елементів системи теплопостачання.
4. Запропоновано комплекс критеріїв щодо оцінки енергетичної ефективності систем централізованого теплопостачання на базі районної опалювальної котельні з використанням когенераційних та теплонасосних технологій.
5. Виконано аналіз вхідних даних щодо моделювання режимів навантаження систем централізованого теплопостачання з надбудовою КУ, що базується на реальному проєкті модернізації системи централізованого теплопостачання м. Одеса.
6. За результатами чисельного моделювання систем централізованого теплопостачання різних конфігурацій визначено залежності показників енергетичної ефективності системи від зміни зовнішніх умов.

7. За отриманими результатами моделювання можна зробити наступні висновки:
- використання когенераційних установок задля забезпечення надійної роботи систем тепlopостачання в умовах відключення електроенергії у якості надбудови котельні є доволі ефективним і технологічним рішенням щодо автономного живлення;
 - утилізоване тепло від когенераційної установки складатиме до 50 % у тепловому балансі опалювальної котельні, що суттєво впливає на підвищення її енергетичної ефективності;
 - підвищити енергетичну ефективність систем централізованого тепlopостачання можливо за рахунок сумісного використання КУ разом з ТН, що забезпечить зростання частки додаткових джерел тепла до 50-70 % у балансі котельні, та, відповідно, збільшить показник енергетичної ефективності до 1,3 разів.

РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ОСНОВНИХ ЗАХОДІВ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ

4.1 Шляхи підвищення надійності енергозабезпечення систем теплопостачання

Як вже зазначалось раніше робота існуючих підприємств генерації тепла практично неможлива без стабільного електропостачання [97]. Вказане питання вирішується резервуванням електропостачання від центральних мереж.

Існує декілька реальних варіантів резервування та повного власного забезпечення потреб котельні теплопостачання в електроживленні, а також допоміжних заходів щодо підвищення надійності енергозабезпечення [70].

1. Резервування джерел живлення (створення дублюючих джерел електроенергії):

- підключення до двох незалежних вводів від різних підстанцій;
- використання дизель-генераторів;
- встановлення когенераційних установок;
- встановлення сонячної електростанції;
- інші джерела електропостачання.

2. Впровадження систем автоматичного ввімкнення резерву (ABP). Системи автоматичного вводу резерву (ABP):

- автоматично перемикають живлення на резервне джерело;
- скорочують час перерви до кількох секунд;
- не потребують втручання персоналу.

3. Використання джерел безперебійного живлення (UPS). UPS застосовуються для:

- живлення автоматики котлів;
- систем диспетчеризації;

- контрольно-вимірювальних приладів.

Вказане дозволяє уникнути повної зупинки котельні при аварії в мережі.

4. Підвищення надійності електромережі:

- заміна застарілих кабелів;
- використання кабельних ліній замість повітряних;
- регулярне технічне обслуговування;
- захист від перевантажень і коротких замикань.

5. Секціонування та резервування внутрішніх мереж:

- розподіл електроспоживачів на незалежні секції;
- резервні лінії живлення для критичних елементів (насоси, автоматика);
- використання двох трансформаторів.

6. Автоматизація та диспетчеризація. Системи контролю:

- SCADA-системи;
- дистанційний моніторинг;
- швидке виявлення аварій.

Вказане скорочує час реагування і запобігає серйозним відмовам.

7. Оптимізація електроспоживання:

- застосування частотних перетворювачів для насосів;
- зменшення пікових навантажень;
- енергоефективне обладнання.

Наведені заходи знижують ризик перевантаження системи.

8. Організаційні заходи:

- регулярні тренування персоналу;
- аварійні інструкції;
- запас палива для генераторів;
- планово-попереджувальні ремонти.

Вказані заходи дозволяють значною мірою підвищити надійність енергозабезпечення систем теплопостачання, зменшити ризики відключення основного та

допоміжного обладнання та підвищити оперативність реагування на нештатні ситуації, які пов'язані із сучасним станом та погодними умовами [98]. Для забезпечення надійності енергозабезпечення систем централізованого теплопостачання пропонується наступна схема електропостачання (рис.4.1).

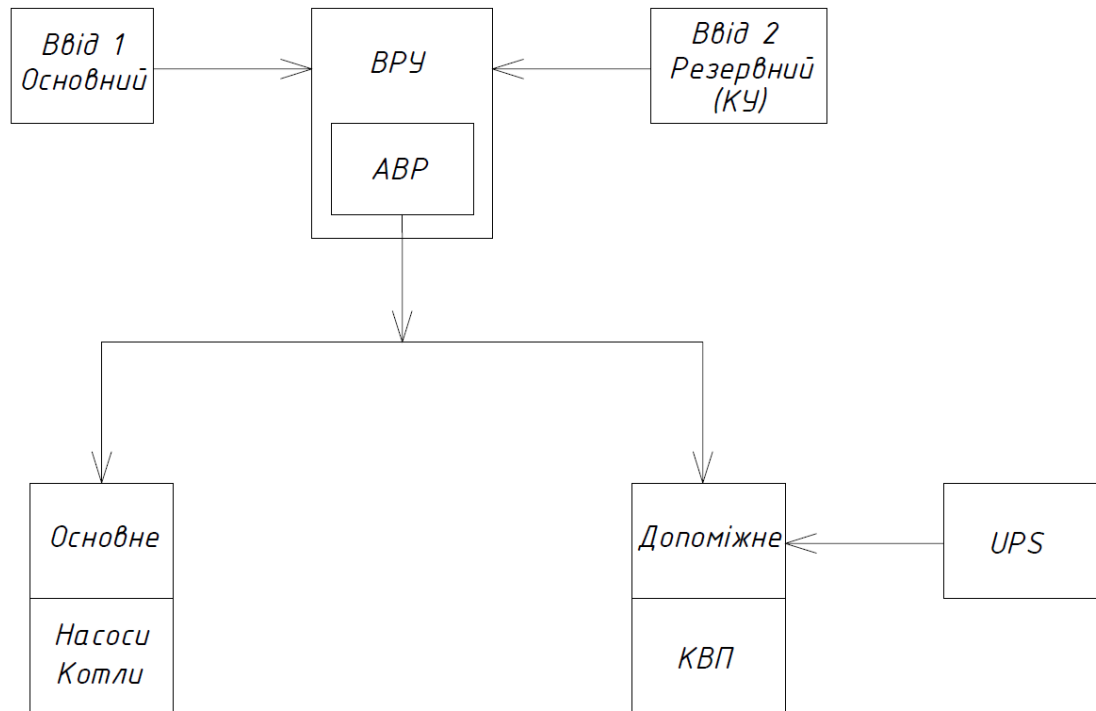


Рисунок 4.1 – Структурно-логічна схема енергозабезпечення джерела централізованого теплопостачання

Відповідно до наведеної схеми пропонується підключення до двох незалежних джерел електропостачання :

Ввід 1 – основне живлення;

Ввід 2 – резерв від іншої підстанції.

Вказане значно зменшує ризик повного знеструмлення основного та допоміжного обладнання систем централізованого теплопостачання.

Ключовим моментом надійності енергопостачання є автоматичне введення резерву (АВР), який:

- автоматично перемикається між вводами;
- час спрацювання: 0.5–5 секунд.

Додатково пропонується для забезпечення безперебійного живлення в момент переключення між двома вводами та збереження повної функціональності Джерело безперебійного живлення (UPS), яке живить:

- автоматику котлів;
- системи контролю;
- диспетчеризацію.

При визначенні рівня захищеності обладнання опалювальної котельні слід враховувати наступні категорії:

1. Основне обладнання:

- котли;
- циркуляційні насоси.

2. Критичні:

- автоматика;
- диспетчеризація та КВП;
- системи безпеки.

3. Допоміжне обладнання.

4. Освітлення, побутові споживачі.

Наведені категорії споживачів дозволяють організовувати логічні послідовності приєднання основних та резервних генераторів електроенергії та встановлювати конфігурацію роботи систем енергопостачання при аварійному вимкненні[9].

4.2 Дослідження експлуатаційних показників когенераційних установок

4.2.1 Передумови широкого впровадження когенераційних установок в системах централізованого теплопостачання

Експериментальне дослідження експлуатаційних показників когенераційних установок було проведено на об'єктах комунально-побутового сектору м. Одеса протягом лютого 2026 року. Цей період характеризувався регулярними масштаб-

ними відключеннями електрики у споживачів (від декількох годин до декількох діб) та досить високим тепловим навантаженням споживачів у зв'язку з низькими температурами зовнішнього повітря.

Встановлення когенераційних установок щодо комплексного енергозабезпечення споживачів набуває дедалі ширших масштабів в Україні у зв'язку з масованими атаками на енергетичну інфраструктуру. Тому набуття досвіду щодо ефективного використання КУ в цих умовах є актуальною задачею.

4.2.2 Основні данні КУ, що були використанні під час дослідження

У роботі розглянуто експлуатаційні показники 6 когенераційних установок, що встановлені у різних районах міста, номінальною електричною потужністю від 180 кВт до 3.3 МВт [49, 39, 94,]. Всі установки поставлено іноземними виробниками.

1. Jenbacher JMC 620 GS-N.L (3,3 МВт, вул. Героїв оборони Одеси, 80-В) (рис. 4.2)

- Напрацювання: 555 мотогодин
- Кількість пусків: 23
- Виробіток активної електроенергії: 1009,9 МВт·год
- Виробіток реактивної енергії: 320 МВар·год
- Споживання газу: 256 985 м³
- Відпущена теплова енергія: 926,68 Гкал
- Середня генерація електроенергії: 1819,64 кВт/год
- Середній відсоток навантаження: 55,14%
- Середня витрата газу: 463,04 м³/год
- Середній відпуск тепла: 1,6697 Гкал/год



Рисунок 4.2 – Зовнішній вигляд встановленої когенераційної установки Jenbacher JMC 620 GS-N.L (3,3 МВт, вул. Героїв оборони Одеси, 80-В)

2. 2G G6720 (0,180 МВт, вул. Ріхтера, 148-Б) (рис. 4.3)

- Напрацювання: 141 мотогодина
- Кількість пусків: 16
- Виробіток активної електроенергії: 15 389 кВт·год
- Виробіток реактивної енергії: 4 440 кВар·год
- Споживання газу: 4 049 м³
- Відпущена теплова енергія: 13,25 Гкал
- Середня генерація електроенергії: 109,14 кВт/год
- Середній відсоток навантаження: 60,63%
- Середня витрата газу: 28,72 м³/год
- Середній відпуск тепла: 0,0940 Гкал/год



Рисунок 4.3 – Зовнішній вигляд встановленої когенераційної установки 2G G6720 (0,180 МВт, вул. Ріхтера, 148-Б)

3. 2G G6720 (0,180 МВт, вул. Клинова, 2) (рис. 4.4)

- Напрацювання: 152 мотогодини
- Кількість пусків: 50
- Виробіток активної електроенергії: 14 587 кВт·год
- Виробіток реактивної енергії: 3 704 кВар·год
- Споживання газу: 3 936 м³
- Відпущена теплова енергія: 14,46 Гкал
- Середня генерація електроенергії: 95,97 кВт/год
- Середній відсоток навантаження: 53,32%
- Середня витрата газу: 25,89 м³/год
- Середній відпуск тепла: 0,0951 Гкал/год



Рисунок 4.4 – Зовнішній вигляд встановленої когенераційної установки 2G G6720 (0,180 МВт, вул. Клинова, 2)

4. 2G G6737 (0,400 МВт, вул. Артура Савельєва, 13-Б) (рис. 4.5)

- Напрацювання: 454 мотогодини
- Кількість пусків: 33
- Виробіток активної електроенергії: 107 653 кВт·год
- Виробіток реактивної енергії: 36 974 кВар·год
- Споживання газу: 28 211 м³
- Відпущена теплова енергія: 65,52 Гкал
- Середня генерація електроенергії: 237,12 кВт/год
- Середній відсоток навантаження: 59,28%
- Середня витрата газу: 62,14 м³/год
- Середній відпуск тепла: 0,1443 Гкал/год



Рисунок 4.5 – Зовнішній вигляд встановленої когенераційної установки
2G G6737 (0,400 МВт, вул. Артура Савельєва, 13-Б)

5. 2G G6738 (0,400 МВт, просп. Небесної сотні, 4) (рис. 4.6)

- Напрацювання: 469 мотогодин
- Кількість пусків: 41
- Виробіток активної електроенергії: 99 657 кВт·год
- Виробіток реактивної енергії: 39 036 кВар·год
- Споживання газу: 26 904 м³
- Відпущена теплова енергія: 104,22 Гкал
- Середня генерація електроенергії: 212,49 кВт/год
- Середній відсоток навантаження: 53,12%
- Середня витрата газу: 57,36 м³/год
- Середній відпуск тепла: 0,2222 Гкал/год



Рисунок 4.6 – Зовнішній вигляд встановленої когенераційної установки
2G G6738 (0,400 МВт, просп. Небесної сотні, 4)

6. 2G G6739 (0,600 МВт, вул. Варненська, 23-а) (рис. 4.7)

- Напрацювання: 388 мотогодин
- Кількість пусків: 19
- Виробіток активної електроенергії: 142 895 кВт·год
- Виробіток реактивної енергії: 59 481 кВар·год
- Споживання газу: 38 056 м³
- Відпущена теплова енергія: 432,3 Гкал
- Середня генерація електроенергії: 368,29 кВт/год
- Середній відсоток навантаження: 61,38%
- Середня витрата газу: 98,08 м³/год
- Середній відпуск тепла: 1,1142 Гкал/год



Рисунок 4.7 – Зовнішній вигляд встановленої когенераційної установки 2G G6739 (0,600 МВт, вул. Варненська, 23-а)

В табл. 4.1 наведено основні фактичні експлуатаційні показники КУ, що отримано за результатами моніторингу їх роботи за вказаний період, та відповідне їх порівняння з номінальними показниками.

Таблиця 4.1 – Експлуатаційні показники когенераційних установок (Одеса, лютий, 2026 р.)

№	Когенераційні установки	Середнє елект-ричне наван-таження, %	Середня витрата газу, м³/год	Середня електрична потужність, МВт	Середня теплова потужність, МВт	Фактичний коефіцієнт використання палива (КВП), %	Номінальний коефіцієнт використання палива(КВП) %	Номінальний електричний ККД, %
1	Jenbacher JMC 620 GS-N.L (3,3 МВт)	55,1	463	1,82	1,94	85,9	90	45,9
2	2G G6720 (0,180 МВт)	60,6	28,7	0,109	0,11	80,9	84	39,8
3	2G G6720 (0,180 МВт)	53,3	25,9	0,096	0,11	79,6	84	39,8
4	2G G6737 (0,400 МВт)	59,3	62,1	0,237	0,17	68,9	86,2	40,9
5	2G G6738 (0,400 МВт)	53,1	57,4	0,212	0,26	82,3	86,2	40,9
6	2G G6739 (0,600 МВт)	61,4	98,1	0,368	1,296	81,4	87,0	41,3

4.2.3 Результати досліджень роботи КУ

Проведені дослідження дозволили провести аналіз електричного навантаження наведених когенераційних установок (рис. 4.8) отримані результати щодо середнього електричного навантаження для більшості КУ лежить в діапазоні 53–61 % від номінального значення. Це свідчить про те, що графік навантаження споживачів електрики має певну добову нерівномірність, яка характерна для комунально-побутового сектору. Коефіцієнт заповнення графіку 53–61 % свідчить про роботу КУ у полупіковому режимі навантаження.

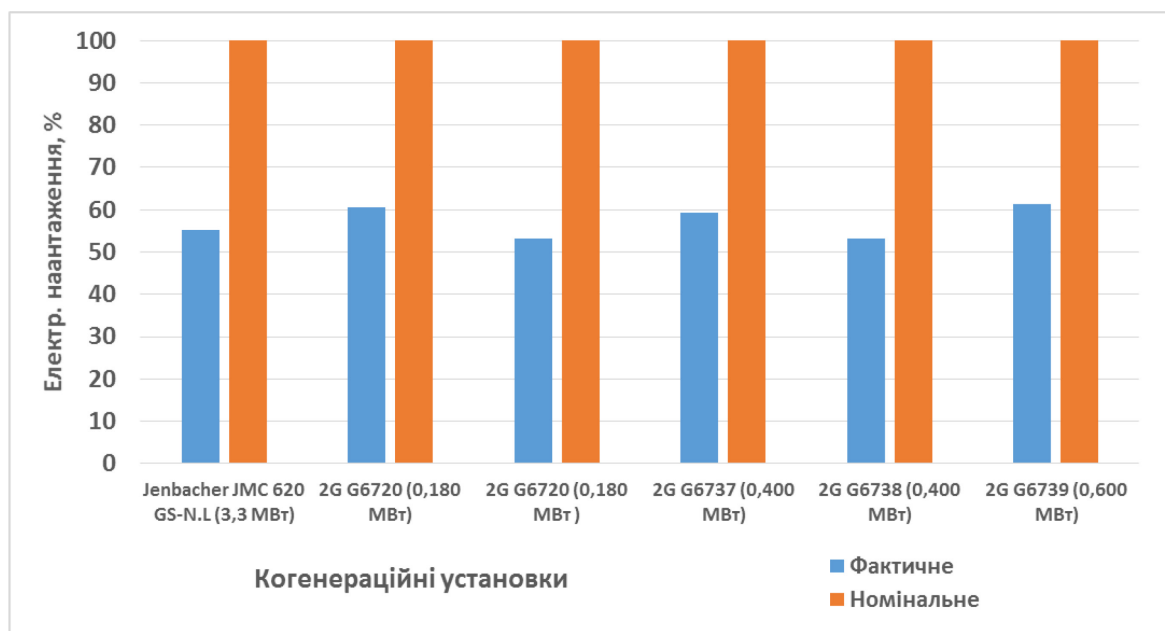


Рисунок 4.8 – Середнє електричне навантаження когенераційних установок (Одеса, лютий, 2026 р.)

Середнє теплове навантаження когенераційних установок (рис. 4.9) лежить в межах 47–56 % від номінального значення, що декілька нижче за середнє електричне навантаження КУ (53–61 %), що свідчить про нерівномірність графіку теплового навантаження споживачів, а також не досить високу ступень утилізації тепла від вихлопних газів КУ.

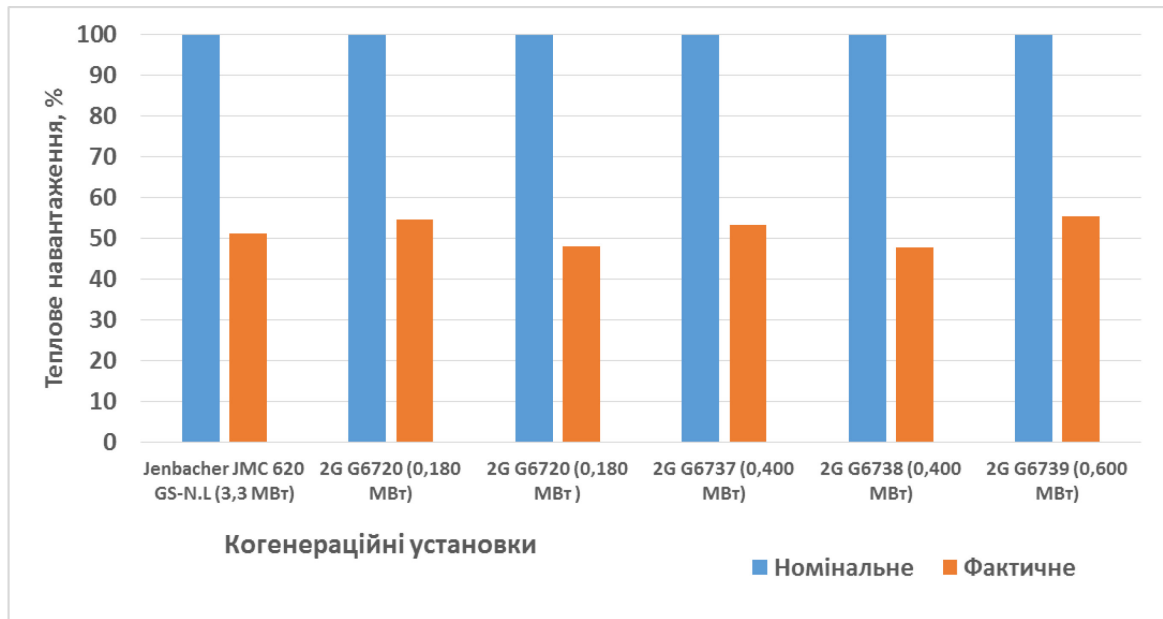


Рисунок 4.9 – Середнє теплове навантаження когенераційних установок (Одеса, лютий, 2026 р.)

Фактичне значення коефіцієнту використання палива (КВП) КУ (рис. 4.10) в порівнянні з його значенням на номінальному навантаженні. Ці значення лежать в межах 69–86 % (відповідно на номінальному навантаженні – 84–90 %), що в середньому майже на 10 % нижче за номінальний режим, але враховуючи полупіковий режим експлуатації КУ, є задовільним рівнем енергетичної ефективності.

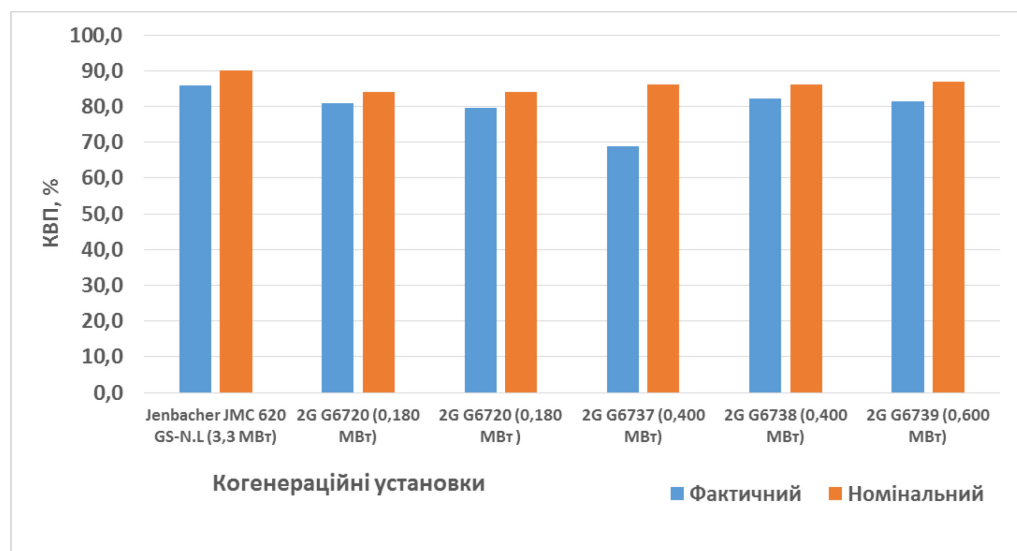


Рисунок 4.10 – Коефіцієнт використання палива (КВП) когенераційних установок (Одеса, лютий, 2026 р.)

Проведенні експериментальні дослідження та їх аналітичний аналіз дають змогу зробити наступні висновки:

1. В складних умовах розподілена генерація на базі КУ вирішує завдання щодо комплексного автономного енергозабезпечення комунально-побутових споживачів електрикою та теплом;
2. Внаслідок нерівномірності добових графіків електричного та теплового навантаження споживачів коефіцієнт заповнення графіків має задовільне значення на рівні 0,53–0,61;
3. КВП КУ нижче за номінальне значення приблизно на 10 %, що є наслідком нерівномірності добового навантаження та неповноти використання утилізованого тепла;
4. Задля підвищення коефіцієнту заповнення добових графіків навантаження доцільно збільшити одиничну номінальну потужність КУ при одночасному підключенні до КУ більшої кількості різноманітних споживачів, графіки добового навантаження яких відрізняються та мають перекривати один одного;
5. Задля підвищення КВП КУ необхідно застосовувати добове акумулювання утилізованого тепла (тобто КУ працює за електричним графіком навантаження), що більш ефективно забезпечить узгодженість електричного та теплового навантаження КУ;
6. Синхронізація КУ з електромережею дозволить працювати КУ за тепловим графіком забезпечення споживача (зі значно більшою добовою рівномірністю), близьким до базового, що значно підвищить значення КВП близько до номінального.

4.2.4 Техніко-економічні показники роботи когенераційної установки у складі комплексу енергозабезпечення систем централізованого теплопостачання.

Для оцінювання ефективності роботи когенераційних установок використовують систему техніко-економічних показників, які характеризують рівень використання паливно-енергетичних ресурсів, економічність виробництва та надій-

ність енергопостачання. Основними показниками є електрична потужність установки, теплова потужність, коефіцієнт корисної дії виробництва електричної енергії, коефіцієнт корисної дії теплогенерації та загальний коефіцієнт використання енергії палива.

До економічних показників належать питомі витрати палива на виробництво електроенергії та теплоти, собівартість енергії, капітальні вкладення, термін окупності інвестицій і річний економічний ефект від впровадження установки.

Комплексний аналіз зазначених техніко-економічних показників дозволяє обґрунтувати доцільність впровадження когенераційних технологій, визначити оптимальні режими їх експлуатації та оцінити ефективність використання в системах централізованого теплопостачання.

На прикладі окремої опалювальної котельні із впровадженою когенераційною установкою було проведено аналіз економічного ефекту на момент лютого 2026 року:

- сумарний тариф на покупку електроенергії з розподілом у лютому 2026 р. з урахуванням податку на добавлену вартість (ПДВ) - 15,7грн/кВт год;
- вартість газу на виробництво електроенергії у лютому 2026р з ПДВ – 26318,52 грн/тис. м³;
- вартість розподілу газу у січні-березні 2026 з урахуванням ПДВ – 1980грн/тис. м³;
- вартість газу з розподілом у лютому 2026 року з з урахуванням ПДВ - 28298,52 грн/тис. м³;
- обсяг виробництва електроенергії КГУ – 1009900 кВт*год;
- обсяг спожитого газу КГУ – 256985 м³;
- обсяг спожитого газу КГУ на виробництво електроенергії – 132684 м³;
- вартість спожитого газу КГУ на виробництво електроенергії з урахуванням ПДВ складає:

$$132,684 * 28298,52 = 3\,754\,761 \text{ грн};$$

- вартість покупної електроенергії з розподілом для власних потреб у постачальників з урахуванням ПДВ складе:

$$1009900 * 15,7 = 15\,855\,430 \text{ грн};$$

- плановий економічний ефект від КГУ з 01.02.26 по 28.02.26 складе:

$$15\,855\,430 - 3\,754\,761 = 12\,100\,669 \text{ грн};$$

- економічний ефект за добу складає – 526 116 грн;

- питомі витрати газу на виробництво 1 кВт год електроенергії:

$$132684 / 1009900 = 0,131 \text{ куб м/кВт*год};$$

- паливна собівартість виробництва 1 кВт год електроенергії без урахування ПДВ складе:

$$0,131 * 23,31 = 3,05 \text{ грн/кВт год};$$

при цьому: середнє навантаження – 55%; напрацювання 555 мотогодин або 23 діб.

4.3 Підвищення надійності енергозабезпечення систем теплопостачання за рахунок використання сонячної електростанції

4.3.1 Сучасний стан використання сонячної енергії для забезпечення автономності електроспоживання

Як вже зазначалося, останні роки характеризуються труднощами з безперебійним забезпеченням об'єктів критичної інфраструктури електричною енергією. Одним із напрямків вирішення цього питання є застосування сонячних електростанцій (СЕС). Сонячні електростанції є ефективним засобом підвищення енергетичної незалежності споживачів та зменшення їхньої залежності від централізованих систем електропостачання. Використання сонячної енергії забезпечує можливість автономного електрозабезпечення, зокрема в умовах аварійних або планових відключень електроенергії.

Потенціал сонячної енергії в Україні є доволі сприятливим для використання сонячної енергії для систем енергопостачання. Упродовж року рівень прямої сонячної радіації визначається сезонними кліматичними умовами та досягає максимальних значень у липні [99, 100]. Максимальна інтенсивність розсіяної сонячної радіації спостерігається у квітні. Для кліматичних умов Одеської області

характерною є значна частка розсіяної сонячної радіації у загальному балансі сонячної енергії, особливо у весняний та літній періоди (рис 4.11).

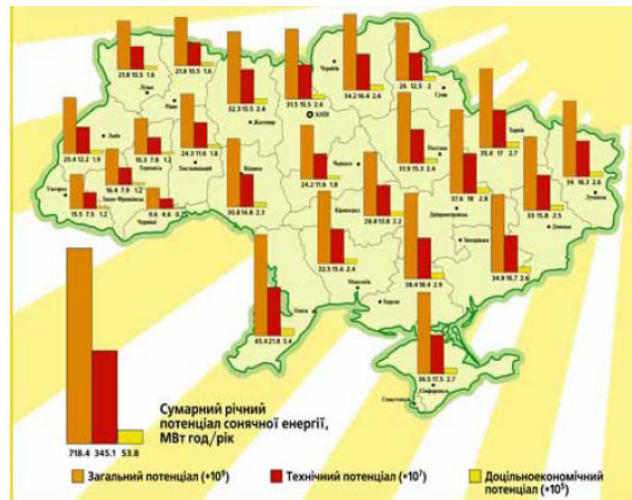


Рисунок 4.11 – Використання потенціалу (загальний, технічний, доцільно-економічний) сонячної активності

4.3.2 Основні фактори, що впливають на ефективність роботи СЕС

Інтенсивність сонячної радіації визначається сукупністю природно-кліматичних чинників, основними з яких є:

- добові та сезонні зміни - інтенсивність сонячної радіації, що надходить на земну поверхню, змінюється циклічно внаслідок обертання Землі навколо власної осі (добові зміни, зумовлені чергуванням дня і ночі) та навколо Сонця. Нахил земної осі до площини екватора обумовлює сезонні зміни сонячної радіації, пов'язані зі зміною літнього та зимового періодів [101];

- прозорість атмосфери - на інтенсивність сонячного випромінювання істотно впливає прозорість атмосфери, яка визначається рівнем її забруднення пилом, аерозолями та промисловими викидами. У великих промислових містах прозорість атмосфери, як правило нижча, ніж у сільській місцевості до 30 %.

- хмарність - значний вплив на інтенсивність сонячної радіації має хмарність. За суцільної хмарності пряма сонячна радіація практично не досягає земної поверхні, а надходить лише розсіяна складова, інтенсивність якої становить близько 15 % сумарної сонячної радіації за безхмарного неба. За відсутності хмар частка прямої сонячної радіації в сумарному потоці зростає до 85 %.

На сьогоднішній день актуальними є розробки на основі сонячної енергії для безперебійного енергозабезпечення об'єктів, зокрема об'єктів критичної інфраструктури, особливо в умовах нестабільного енергопостачання. Лідируючу роль виконують сонячні фотоелектричні станції [102, 103]. Дані електростанції набули найбільшого поширення.

Однак, при дослідженні ефективності роботи сонячних електростанцій, необхідно брати до уваги фактори, що впливають на енергетичні показники обладнання:

- характеристика електричних параметрів сонячного елемента;
- вплив на навколишнє середовище (екологічні міркування);
- розрахунок вихідної потужності.

4.3.3 Склад сучасних СЕС

Основний елемент сонячної електростанції – фотоелектрична батарея, що складається з елементів, модулів, масивів (рис 4.12).

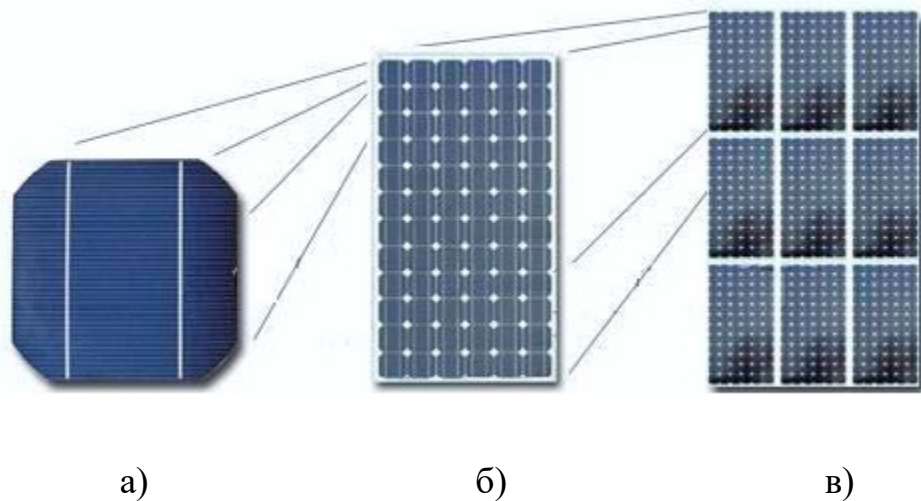


Рисунок 4.12 – Блоки сонячної електрики

а) елемент, б) модуль, в) масив

Існує кілька видів сонячних електростанцій: мережева, автономна та гібридна [104].

У мережевих сонячних електростанціях не передбачені акумуляторні батареї, вони підключаються до загальної електромережі і призначені для заміщення електроенергії з мережі електроенергією від сонця у реальному часі, а також для скидання зайвої електроенергії від сонця в мережу.

Автономна станція на сонячній батареї проєктується для об'єктів повністю відрізаних від магістральних мереж. Її завдання гарантувати безперебійне живлення всіх приєднаних приладів виключно за рахунок накопиченої енергії. Такі станції на сонячних батареях гостро потребують ємних акумуляторів, здатних підтримувати роботу в похмурі дні та вночі. Ці станції найдоцільніше застосовувати там, де немає центральної електричної мережі.

Особливу цікавість викликають гібридні сонячні станції (рис. 4.13).

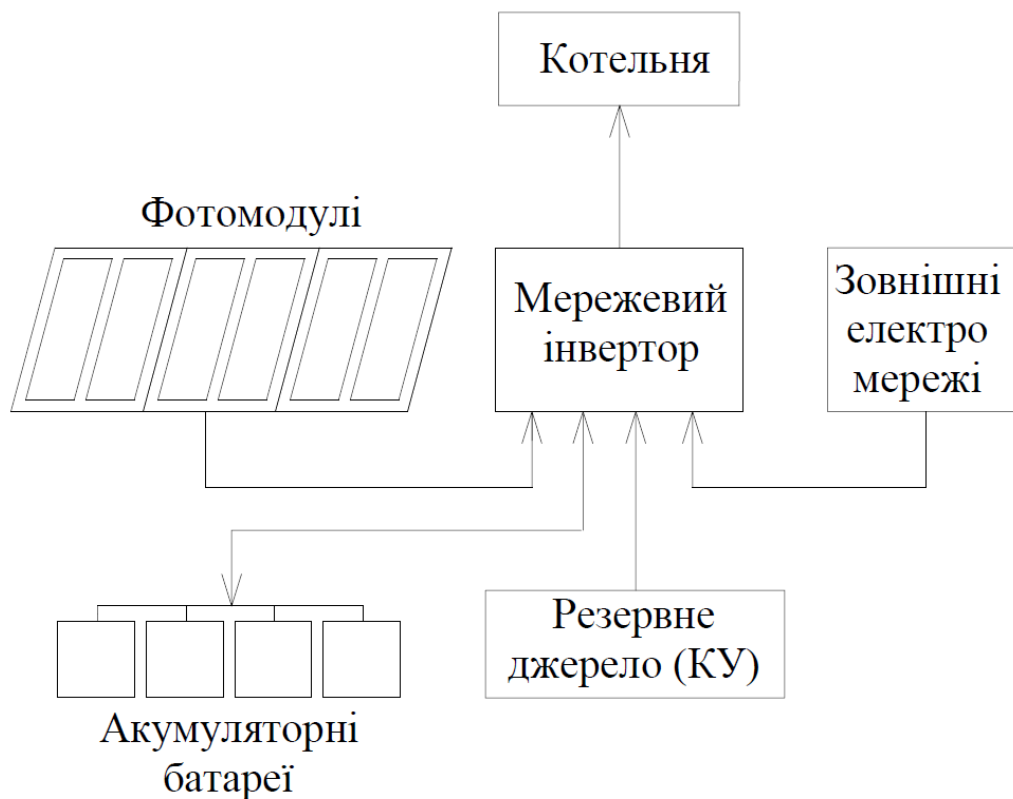


Рисунок 4.13 – Схема гібридної сонячної станції

Гібридні СЕС поєднують у собі мережеві та автономні станції, можуть як накопичувати енергію в акумуляторних батареях, так і продавати надлишки державі, а також заряджати акумуляторні батареї як від мережі, так і від сонячних панелей

4.3.4 Методика розрахунку СЕС

Сучасні методики розрахунку потужності сонячних електростанцій які застосовані в діючих стандартах та методичних рекомендаціях розрахунку продуктивності СЕС зазвичай застосовані на таблицях даних кліматології відповідного регіону. Вказаний підхід розрахунку потужності сонячних електростанцій відповідає низки вимогам та стандартам впровадженим у ЕС, однак також має декілька недоліків, основні з них:

- складність застосування емпіричних даних для використання в якості вихідних даних при моделюванні процесів роботи СЕС для конкретних випадків розташування сонячних модулів;
- складно, практично не можливо визначити інтенсивність сонячного випромінювання на поверхню фотомодуля при різних орієнтаціях при різних умовах встановлення.

В обраній для розрахунків методиці [105,106] застосовано підхід, який дозволяє визначати інтенсивність сонячного випромінювання, що надходить на довільну поверхню фотомодулів СЕС при індивідуальних умовах розташування основного обладнання сонячної електростанції в будь який момент часу [107].

Потік прямої сонячної радіації на поверхню фотомодулів під розрахунковим кутом, дорівнює:

$$S_{np} = S \cos \theta_{am_{max}} \quad (4.1)$$

де θ – приведений кут падіння сонячних променів на поверхню інсоляції, рад., причому:

$$\cos \theta = \sin h \cdot \cos \alpha + \sin \alpha \cdot (\cos \psi_z \cdot \tan L \cdot \sin h + \sin \psi_z \cdot \cos \delta \cdot \sin \tau) \quad (4.2)$$

де α – кут нахилу площини сонячного колектора до горизонту, град.;

L – географічна широта місцевості, де розміщений геліоколектор, град.;

ψ_z – азимут поверхні колектора, град., тобто кут між нормаллю до площини колектора і напрямком на південь (це дозволяє розраховувати теплонадходження на поверхні, які не строго орієнтовані на південь);

τ – часовий кут, град.;

δ – схилення Сонця, град.

$$\delta = 23,45 \cdot \sin \left[\frac{2\pi}{365} \cdot (284 + N) \right] \quad (4.3)$$

де N – порядковий номер дня року (починаючи з 1, що відповідає 1-му січню);

h – кут, який визначає висоту Сонця над горизонтом в даний момент часу, град., синус цього кута дорівнює:

$$\sin h = \cos \tau \cdot \cos \delta \cdot \cos L + \sin \theta \cdot \cos L \quad (4.4)$$

K_{am} – коефіцієнт, який враховує поправку на повітряну масу, яку необхідно пройти променю:

$$K_{am} = 1,1254 - \frac{0,1366}{\sin h} \quad (4.5)$$

4.3.5 Результати моделювання роботи СЕС для окремої опалювальної котельні

Для опалювальної котельні з вільною площею даху 410 м² з метою забезпечення живлення електроенергією під час аварійних відключень від центральних електромереж пропонується розташувати сонячну електростанцію потужністю 54 кВт. В якості основного обладнання пропонуються фотоелектричні модулі (рис. 4.14) з параметрами (рис. 4.15)

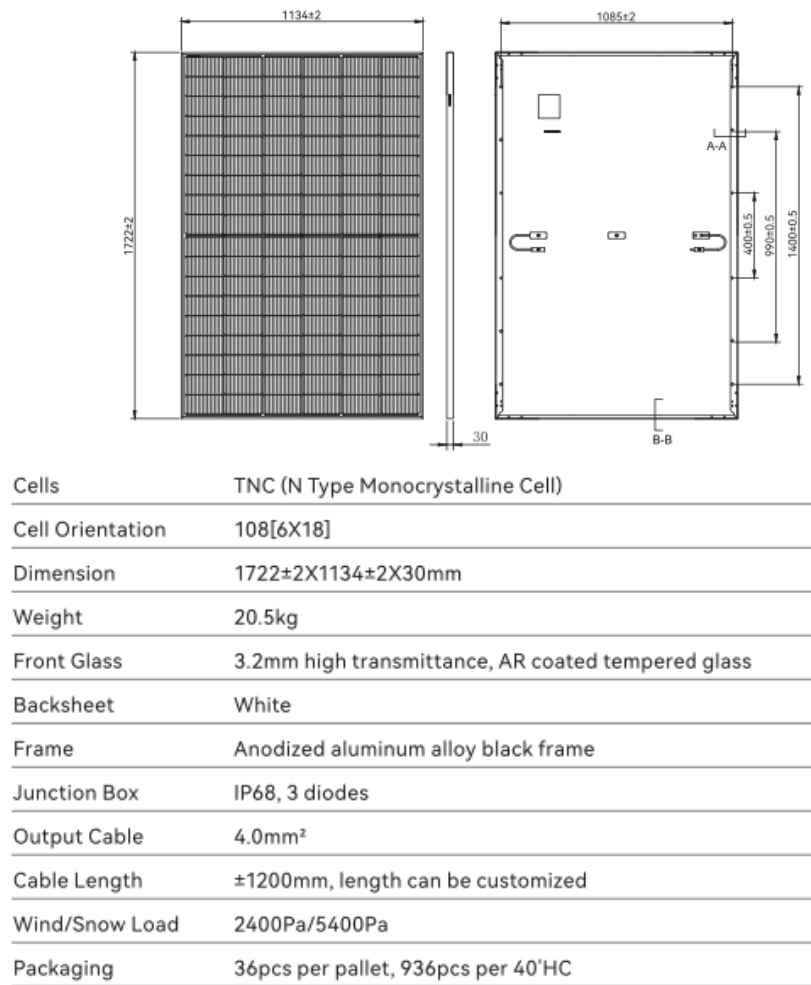


Рисунок 4.14 – Основні механічні параметри фотоелектричного модуля

Орієнтація модулів на даху котельні для раціонального розміщення та ефективного застосування – схід-південь (рис. 4.16). Актуальною проблемою є те, що взимку активність сонячної радіації, а отже, і продуктивність сонячної електростанції є мінімальними [108]. Водночас потужність споживачів електроенергії котельні в цю пору року максимальна, тоді як влітку сонячна електростанція генерує максимальну потужність при мінімальному споживанні енергії котельнею.

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (STC)

Module Type: TWMND-54HSXXX

Maximum Power: Pmax [W]	420	425	430	435	440
Open Circuit Voltage: Voc [V]	38.85	39.00	39.15	39.30	39.45
Short Circuit Current: Isc [A]	13.57	13.62	13.67	13.72	13.77
Voltage at Maximum Power: Vmp [V]	32.92	33.09	33.26	33.43	33.60
Current at Maximum Power: Imp [A]	12.76	12.85	12.93	13.01	13.10
Module Efficiency: η [%]	21.5	21.8	22.0	22.3	22.5

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (NMOT)

Maximum Power: Pmax [W]	316.0	320.0	324.0	327.8	331.8
Open Circuit Voltage: Voc [V]	36.89	37.04	37.19	37.33	37.47
Short Circuit Current: Isc [A]	10.90	10.96	11.02	11.06	11.10
Voltage at Maximum Power: Vmp [V]	30.64	30.81	30.98	31.14	31.30
Current at Maximum Power: Imp [A]	10.31	10.39	10.46	10.52	10.60

* STC: Irradiance 1000W/m², Cell Temperature 25°C, Air Mass1.5, Measuring Tolerance: $\pm 3\%$

* NMOT: Irradiance 800W/m², Ambient Temperature 20°C, Air Mass1.5, Wind Speed 1m/s

TEMPERATURE PARAMETERS

Temperature Coefficient (Pmax)	-0.30%/°C
Temperature Coefficient (Voc)	-0.25%/°C
Temperature Coefficient (Isc)	+0.046%/°C
NMOT	45 $\pm$ 2°C

MAXIMUM RATINGS

Operational Temperature	-40°C~+85°C
Maximum System Voltage	1500V DC
Maximum Series Fuse Rating	25A
Power Output Tolerance	0~+5W

Рисунок 4.15 – Основні технічні параметри фотоелектричного модуля



Рисунок 4.16 – Фото даху опалювальної котельні.

З іншого боку, продуктивність сонячної електростанції залежить від куту нахилу панелей, оптимальне значення якого також залежить від пори року. Для визначення раціонального з точки зору ефективності роботи сонячної електростанції кута нахилу панелей під час роботи було проведено дослідження сонячної електростанції протягом року при різних кутах нахилу модулів [109]. При цьому було враховано тип сонячної електростанції – гібридний з підключенням до центральних електромереж (рис. 4.17).

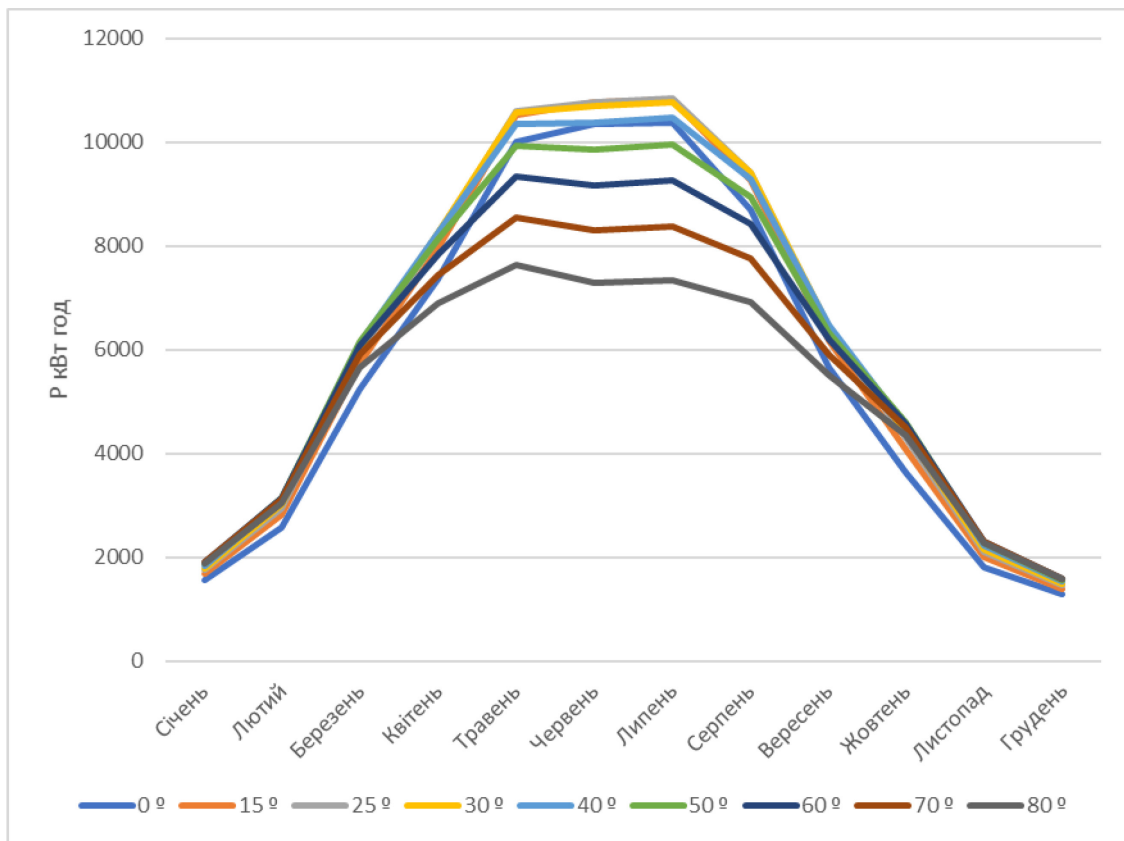


Рисунок 4.17 – Графік залежності продуктивності сонячної електростанції протягом року від кута нахилу панелей

Отримані результати дозволяють обрати оптимальний кут нахилу модуля для ефективного використання згенерованої електроенергії з метою забезпечення споживачів котельні [110]. Максимальні показники сонячної електростанції для даного розташування відповідають куту нахилу 30° (річний видобуток СЕС складає 75048 кВт·год), при цьому за опалювальний період видобуток СЕС складає 14467 кВт·год. Максимальна продуктивність СЕС з точки зору опалювального періоду складає 15001 кВт·год при куті нахилу 50° , при цьому річний видобуток СЕС складає 72780 кВт·год. Також слід враховувати, що кут нахилу впливає на крок розміщення модулів сонячної електростанції, що, в свою чергу, впливає на необхідну площу даху для встановлення СЕС тієї ж потужності. Якщо порівняти наведені потужності у відносних показниках для кутів нахилу 30° та 50° , то збільшення потужності в зимовий період складе 4 %, а зменшення річного видобутку

електроенергії СЕС складе 3 %. Вказані показники мають невеликі відхилення, тому при прийнятті рішення необхідно враховувати додаткові обставини.

4.4 Порівняльний аналіз застосування різних заходів підвищення надійності опалювальної котельні

Проведені дослідження дозволяють порівняти основні показники різних заходів щодо підвищення надійності енергозабезпечення опалювальних котелень. Для порівняння було обрано найпоширеніші автономні джерела енергопостачання, а саме:

- встановлення когенераційних установок;
- встановлення сонячної електростанції;
- використання дизель-генераторів.

Показники за якими було проведено аналітичне дослідження (табл. 4.2):

- забезпечення електроенергією основних споживачів котельні в опалювальний період;
- можливість зливати надлишки електроенергії в центральні мережі;
- можливість зливати залишки теплоти в теплові мережі;
- незалежність від природного палива;
- маневреність генерації енергії;
- екологічність;
- ефективність використання палива.

Також було проведено аналіз забезпечення вказаними резервними джерелами енергозабезпечення основних категорій споживачів електроенергії котельні (табл. 4.3).

Таблиця 4.2 – Порівняльний аналіз основних резервних джерел енергії за основними показниками

Найменування показника	КУ	СЕС	Дизель- генератор
Забезпечення електроенергією основних споживачів котельні в опалювальний період	100 %	5-10 %	100 %
Можливість зливати надлишки електроенергії в центральні мережі	+	+	-
Найменування показника	КУ	СЕС	Дизель- генератор
Можливість зливати залишки теплоти в теплові мережі	+	-	-
Незалежність від природного палива	-	+	-
Маневреність генерації енергії	+	-	+
Екологічність	-	+	-
Ефективність використання палива	до 90 %	-	до 30 %

Таблиця 4.3 – Порівняльний аналіз основних резервних джерел енергії за рівнем надійності забезпечення основних категорій споживачів опалювальної котельні

Найменування категорії	КУ	СЕС	Дизель - генератор
1. Основне обладнання: - котли; - циркуляційні насоси.	+	-	+
2. Критичні: - автоматика; - диспетчеризація та КВП;	+	+	+
3. Допоміжне обладнання.	+	-	+
4. Освітлення, побутові споживачі.	+	+	+

Отримані результати показують певні переваги впровадження когенераційних установок у системи енергозабезпечення об'єктів критичної інфраструктури – опалювальних котелень. КУ здатні повністю покривати потреби споживачів електроенергії котельні, працювати практично автономно, а також бути додатковими джерелами теплоти та електроенергії для зовнішніх споживачів. Можливість ски-

дати надлишки електроенергії або теплоти при перекосах навантажень сприяє підвищенню ефективності їх роботи при максимальних значеннях КВП.

Також слід відмітити, що мережа КУ в системах енергозабезпечення здатна підвищити загальну надійність енерговиробництва в комунальному секторі. Водночас цікавою є комбінація роботи КУ з СЕС. Так, у літній період року, коли потреба в теплоті в центральних мережах майже відсутня, а потреби в електропостачанні споживачів котельні, хоча й низькі, а все ж присутні, ефективність КУ значно падає, при цьому СЕС здатні покрити необхідну потребу в енергозабезпеченні котельні. Вказане потребує додаткового дослідження.

4.5 Висновки до розділу 4

1. Виявлено основні варіанти підвищення надійності енергопостачання основних споживачів електроенергії котелень за рахунок резервування джерел електроживлення. Визначено основні категорії основних споживачів електроенергії котелень.

2. Проведено дослідження роботи когенераційних установок на 6 котельнях м. Одеса.

3. Внаслідок нерівномірності добових графіків електричного та теплового навантаження споживачів коефіцієнт заповнення графіків має задовільне значення на рівні 0,53–0,61.

4. КВП КУ нижче за номінальне значення приблизно на 10 %, що є наслідком нерівномірності добового навантаження та неповноти використання утилізованого тепла.

5. Задля підвищення коефіцієнта заповнення добових графіків навантаження доцільно збільшити одиничну номінальну потужність КУ при одночасному підключенні до КУ більшої кількості різноманітних споживачів, графіки добового навантаження яких відрізняються та мають перекривати один одного.

6. Використання даху котельні для встановлення сонячної електростанції не вирішує повністю питання забезпечення безперебійного електропостачання споживачів джерел теплоти 1 категорії.

7. Проведене дослідження дозволило виявити раціональний кут нахилу модулів сонячної електростанції, який лежить в межах 30° – 50° .

8. Порівняльний аналіз резервних джерел теплоти для підвищення надійності енергозабезпечення котелень показав певну перевагу когенераційних установок за основними показниками.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

1. Проведений аналіз поточного стану теплоенергетики житлово-комунального господарства, на частку якої припадає значна частина споживання енергоресурсів, свідчить про необхідність суттєвої модернізації з метою підвищення енергоефективності.

2. На основі отриманих даних аналізу споживання енергоресурсів сектором комунальної теплоенергетики запропоновано основні шляхи реалізації програми енергозбереження та удосконалення енерготехнологій.

3. Аналіз сучасного стану енергозабезпечення основних джерел тепlopостачання виявив основні шляхи щодо підвищення надійності енергопостачання систем централізованого теплозабезпечення об'єктів комунального господарства.

4. Показано перспективу впровадження когенераційних установок для енергозабезпечення об'єктів комунальної теплоенергетики. Для оцінки ефективності впровадження когенераційних установок для енергозабезпечення джерел теплоти потрібно провести додаткові наукові дослідження.

5. Наведено основні вимоги до сучасних систем тепlopостачання з точки зору експлуатації. Визначено основні категорії споживачів електроенергії котелень.

6. Показано доцільність резервування систем енергопостачання джерел тепlopостачання за рахунок власної електрогенерації, на базі двигунів внутрішнього згоряння, парових або газових турбін. Найперспективнішим є резервування за рахунок вбудованої в основну схему генерації тепла, систему генерації електроенергії, тобто повної або часткової когенерації.

7. Визначено, що застосування газових турбін доцільне за великих потужностей електроспоживання в котельні теплогенеруючого підприємства, у котельнях із водогрійними котлами середньої потужності або для незалежного електропостачання теплогенеруючого комплексу з більш дрібних котелень.

8. Методом експертних оцінок визначено ймовірність відмови централізованого електрозабезпечення системи ТЗ, отриманий результат свідчить про рівень важливості впровадження резервної електрогенерації.

9. Проведено аналіз підходів щодо підвищення надійності систем централізованого теплопостачання в умовах відключення електроенергії для районної опалювальної котельні з використанням когенераційних та теплонасосних технологій.

10. Запропоновано схемні рішення застосування когенераційних установок для сумісного видобутку теплоти та електроенергії:

- автономне застосування КУ задля власних потреб котельні в електриці;
- з підключенням КУ до електромережі;
- забезпеченням електрикою від КУ власних потреб котельні та додаткових джерел тепла (теплових насосів).

11. Розроблено математичну модель системи енергозабезпечення на базі газопоршневої когенераційної установки та моделі основних елементів системи теплопостачання.

12. Запропоновано комплекс критеріїв щодо оцінки енергетичної ефективності систем централізованого теплопостачання на базі районної опалювальної котельні з використанням когенераційних та теплонасосних технологій.

13. За результатами чисельного моделювання систем централізованого теплопостачання різних конфігурацій визначено залежності показників енергетичної ефективності системи від зміни зовнішніх умов.

14. Проведено дослідження роботи когенераційних установок на 6 котельнях м. Одеса.

15. Внаслідок нерівномірності добових графіків електричного та теплового навантаження споживачів коефіцієнт заповнення графіків має задовільне значення на рівні 0,53–0,61.

16. КВП КУ нижче за номінальне значення приблизно на 10 %, що є наслідком нерівномірності добового навантаження та неповноти використання утилізованого тепла.

17. Використання даху котельні для встановлення сонячної електростанції не вирішує повністю питання забезпечення безперебійного електропостачання споживачів джерел теплоти 1 категорії.

18. Проведене дослідження дозволило виявити раціональний кут нахилу модулів сонячної електростанції, який лежить в межах 30° – 50° .

19. Порівняльний аналіз резервних джерел теплоти для підвищення надійності енергозабезпечення котелень показав певну перевагу когенераційних установок за основними показниками.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Закон України «Про енергетичну ефективність».
<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1818-20-Text>
2. Енергетична стратегія України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність».
<https://zakon.rada.gov.ua/laws/file/text/58/f469391n10.pdf>
3. Директива 2004/8/EC: Directive 2004/8/EC of the European Parliament and of the Council of 11 February 2004 on the promotion of cogeneration based on a useful heat demand in the internal energy market and amending Directive 92/42/EC.
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32004L0008>
4. Директива 2012/27/ЄС «Про енергоефективність»
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32012L0027>
5. Директива ЄС 2023/1791: Directive (EU) 2023/1791 of the European Parliament and of the Council of 13 September 2023 on energy efficiency and amending Regulation (EU) 2023/955 (recast).
<https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2023/1791>
6. Розпорядження Кабінету Міністрів України від 18 серпня 2017 р. № 569-р «Про схвалення Концепції реалізації державної політики у сфері теплопостачання». <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/569-2017-%D1%80>
7. Закон України «Про комбіноване виробництво теплової та електричної енергії (когенерацію) та використання скидного енергопотенціалу».
<https://законодавство.com/ukrajiny-zakony/zakon-ukrajini-pro-kombinovane-virobnitstvo2005-702.html>
8. Когенерація у водогрійних котельнях з котлами ПТВМ100 при використанні органічного циклу Ренкіна / С. Ю. Андрєєв, В. А. Маляренко, О. Л. Шубенко, М. Ю. Бабак, О. В. Сенецький, І. О. Темнохуд // Інтегровані технології та енергозбереження. Щоквартальний науково-практичний журнал. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 2. – С. 48-60. –ISSN 2078-5364.

9. Дослідження можливості застосування та вибір найбільш енергоефективних когенераційних технологій на районних котельнях комунального підприємства «Харківські теплові мережі» на підставі техніко-економічних обґрунтувань / В. А. Маляренко, Б. С. Ільченко, І. А. Немировський, М. Ю. Бабак, О. В. Сенецький, І. О. Темнохуд, Г. В. Гарбуз // Звіт про науково-дослідну роботу. – 260 с.

10. Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council of the European union of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources. – Available from: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2018/2001/oj>

11. The 2030 climate and energy framework. European Commission.
URL: <https://www.consilium.europa.eu/en/policies/climate-change/2030-climate-and-energy-framework/>. (дата звернення: 02.03.2024).

12. REPowerEU at a glance. Website of the European Commission.
URL: https://commission.europa.eu/topics/energy/repowereu_en. (дата звернення: 09.06.2025).

13. Енергоефективність будівель в Україні.
URL: <https://dergbud.org.ua/enerhoefektyvnist-budivlua.html>.

14. Про схвалення Стратегії формування та реалізації державної політики у сфері зміни клімату на період до 2035 року і затвердження операційного плану заходів з її реалізації у 2024-2026 роках: розпорядження Кабінету Міністрів України від 30.05.2024 № 483-р.
URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/483-2024-%D1%80#Text>. (дата звернення: 09.06.2025).

15. Концепція «зеленого» енергетичного переходу України до 2050 року, Мінекоенерго, 2020 <https://bit.ly/2tR0P7n>

16. Про затвердження Національного плану дій з відновлюваної енергетики на період до 2030 року та плану заходів з його виконання: розпорядження Кабінету Міністрів України від 13.08.2024 № 761-р.
URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/761-2024-%D1%80#Text>. (дата звернення: 09.06.2025).

17. Розпорядження Кабінету Міністрів України №1228 від 25 листопада 2015 р. Про Національний план дій з енергоефективності на період до 2029 року // Урядовий кур'єр. – 2015. – № 233. – Режим доступу : <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/1228-2015-%D1%80>. , вільний.

18. Розпорядження Кабінету міністрів України № 1071 від 24 липня 2013 р. Енергетична стратегія України на період до 2030 року / Кабінет Міністрів України. – 24.07.2013. – № 1071. – 166 с. – Режим доступу : <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/n0002120-13>.

19. Малярєнко В. А. Аналіз споживання паливноенергетичних ресурсів України та їх раціонального використання / В. А. Малярєнко, І. О. Щербак // Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – 2013. – № 14. – С. 118–127.

20. Енергетична галузь України : підсумки 2015 року /К. Маркевич, В. Омельченко, Г. Пашкова, Т. Овсяник. – Київ : Центр Разумкова, Видавництво „Заповіт”, 2016. – 71 с. – ISBN 978-966-7272-82-1 – Режим доступу : http://razumkov.org.ua/upload/2016_ENERGY.pdf. , вільний.

21. Маркевич К. Глобальні енергетичні тренди крізь призму національних інтересів України / К. Маркевич, В. Омельченко. – Київ : Заповіт, 2016. – 120 с. – ISBN 978-966-7272-87-6. – Режим доступу : http://www.razumkov.org.ua/images/broshura/2016_ENERGY-S.pdf. , вільний.

22. Тульчинська С. О. Виробництво та споживання електроенергії в Україні / С. О. Тульчинська, Б. П. Чорній // Сучасні проблеми економіки і підприємництва. – 2016. – № 18. – С. 56–62.

23. Звіт з оцінки відповідальності (достатності) генеруючих потужностей. — 2019 р, НЕК «Укренерго».

24. Г.І. Позднякова, Є.С. Бабаєв. Шляхи підвищення енергоефективності теплопостачання районів міст за рахунок комплексної модернізації інженерних систем будівель. Refrigeration Engineering and Technology. Том 60 № 1 (2024), 45-52. <https://journals.ontu.edu.ua/index.php/reftech/article/view/2735/3156>.

25. Розпорядження Кабінету Міністрів України від 18 серпня 2017 р. № 569-р «Про схвалення Концепції реалізації державної політики у сфері теплопостачання». <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/569-2017-%D1%80>.

26. Директива ЄС 2015/2193 від 25.11.2015 р. «Про обмеження викидів у повітря певних забрудників від середніх спалювальних установок». <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32015L2193>.

27. Г.І. Позднякова, О.І. Сігал, Д.Ю. Падерно. Теплопостачання міста Одеси. Монографія. Київ. Наукова думка. 2024. 224 стор. ISBN 978-966-00-1919-5

28. Позднякова Г.І. ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ СИСТЕМИ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ. 3rd International Scientific and Practical Conference «Modern Trends in the Development of Economy, Technology and Industry» Collection of Scientific Papers April 9-11, 2025 Toronto, Canada. стор. 307-311
<https://doi.org/10.70286/ISU-09.04.2025>.

29. Климчук О. А., Позднякова Г. І. МОДЕРНІЗАЦІЯ ТЕПЛОВИХ МЕРЕЖ У ПОВОЄННИЙ ПЕРІОД. ПРОБЛЕМИ ЕКОЛОГІЇ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЇ ОБ'ЄКТІВ ЕНЕРГЕТИКИ. XXXIV міжнародна конференція “Проблеми екології і експлуатації об’єктів енергетики”. Збірник праць. ІВЦ АЛКОН. Київ 2024. стор.50-53. https://ittf.kiev.ua/wp-content/uploads/2025/01/sbornik_2024_pp.pdf.

30. Лужанська Г.В. Бабаєв Є.С. Сергєєв М.І. Позднякова Г.І. Климчук І.О. Аналіз сучасного стану енергопостачання для комунальної енергетики в загальному енергетичному балансі країни. 9th International Scientific and Practical Conference THEORY AND PRACTICE OF SCIENCE: KEY ASPECTS ROME, ITALY February 19-20, 2024. р. 496-502. <https://doi.org/10.51582/interconf.19-20.02.2024>.

31. Климчук О.А., Позднякова Г.І. ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ У СИСТЕМАХ КОМБІНОВАНОГО ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ. Тези доповідей XXXIII МІЖНАРОДНОЇ НАУКОВО-ПРАКТИЧНОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ: НАУКА, ТЕХНІКА, ТЕХНОЛОГІЯ, ОСВІТА, ЗДОРОВ'Я MicroCAD- 2025. Національний університет «Одеська політехніка», м. Одеса стор. 760.

32. Інтерфакс-Україна (<https://bin.ua/news/economics/faec/270096-ukraina-za-9-mes-uvelichila-proizvodstvo.html>).

33. Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних енергії України: видання третє, оновлене / за заг. ред. С. О. Кудрі. Київ: Інститут відновлюваної енергетики НАН України, 2024. 56 с.

34. Енергетична стратегія України на період до 2030 року. Схвалена Розпорядженням КМУ №1071 від 24.07.2013. <http://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/n0002120-13/paran3#n3>.

35. Current Issues on Operation and Management of Distributed Resources / F. Batrinu, G. Chicco, R. Pomrub and other // 5th Int. World Energy System Conf., Oradea, Pomania, May 17-19, 2004. – P. 31–36.

36. Development of dispersed generation and consequences for power systems // CIGRE Working Group C6/01. – Electra, 2004. – № 215. – P. 39–49.

37. Legmann H. Recovery of low grade heat by means of the ORC process in the cement industry [Electronic resource] / Hilel Legmann, David Citrin // ORMAT International, Inc.: official site. – Access mode : http://www.ormat.com/media_center.php?did=147&aid=818df6349556350_f09466946eb1c7b9b. , free. – Title from the screen.

38. Anton Mazurenko, Anton Panda, Oleksandr Klymchuk, Ganna Pozdniakova, Anatoliy Pustovit, Jan Valicek, Marta Harnicarova. Stability of systems in extreme operating conditions. Mm science journal i 2025 i november. P 8916-8920

[DOI : 10.17973/MMSJ.2025_11_2025037](https://doi.org/10.17973/MMSJ.2025_11_2025037)

39. Cogeneration units and diesel gensets [Electronic resource] / MOTORGAS : official site. – Access mode: <http://www.motorgas.cz/>. , free. – Title from the screen.

40. Papathanassiou S. A. Technical Requirements for the Connection of Dispersed Generation to the Grid / S. A. Papathanassiou, N. D. Hatziargyriou // 2001 IEEE PES Summer Meeting, Vancouver, Canada, July 15-19, 2001. – P. 134–138.

41. Funabashi T. Study on Protection and Control of Dispersed Generation / T. Funabashi // 2001 IEEE PES Summer Meeting, Vancouver, Canada, July 15-19, 2001. – P. 131–133.

42. A. Mazurenko, A. Klymchuk, G. Pozdniakova, A. Pustovit, V. Shavrov. Problems of reliable heat supply providing in the conditions of non-guaranteed electricity supply to heat-generating enterprises. Proceedings of Odessa Polytechnic University: Scientific, science and technology collected articles. Odesa, 2024. Issue 1(69). Pp. 23-31. <https://doi.org/10.15276/opu.1.69.2024.03>.

43. Дослідження перспектив впровадження когенераційних технологій в комунальній енергетиці України / С. Ю. Андрєєв, В. А. Маляренко, І. О. Темнохуд, О. Л. Шубенко, М.Ю. Бабак, О.В. Сенецький // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2015. – № 8 (74). – Т. 2. – С. 11–17. – ISSN 1729-3774.

44. Minea Vasile. Power generation with ORC machines using low-grade waste heat or renewable energy / V. Minea // Applied Thermal Engineering. – 2014. – P. 143–154.

45. Next-generation microturbines [Electronic resource] / Capstone Turbine Corporation: official site. – Access mode: <http://www.capstoneturbine.com>, free. – Title from the screen.

46. Когенераційні технології в малій енергетиці: монографія / В. А. Маляренко, О. Л. Шубенко, С. Ю. Андрєєв, М. Ю. Бабак, О. В. Сенецький / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова, Ін-т проблем машинобуд. ім. А. М. Підгорного. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2018. – 454 с.

47. Clean energy ahead Turboden [Electronic resource] /Turboden s.r.l.: official site. – Electronic data (1 PDF file, 1372552 kB, rus.). System requirements: Adobe Acrobat Reader. – Access mode : [http://www.turboden.eu/en/public/downloads/ Presentation_of_Turboden_ORC_Technology_Russian.pdf](http://www.turboden.eu/en/public/downloads/Presentation_of_Turboden_ORC_Technology_Russian.pdf), free.

48. Energy [Electronic resource] / Kawasaki: official site. – Access mode: <http://global.kawasaki.com/en/energy/index.html>., free. – Title from the scree

49. MWM gas engines, gensets, cogeneration, chp plant, combined heat and power [Electronic resource] / MWM: official site. – Access mode: <http://www.mwm.net/>. , free.

50. <https://ecotown.com.ua/news/Skilky-sonyachnykh-batarey-i-akumulyatoriv-potribno-dlya-vashoho-budynku/>.

51. <https://joule.net.ua/ua/articles/skeelki-potreebno-sonyachnih-batarej-dlya-budinku>.
52. Климчук О.А., Позднякова Г.І. ВИКОРИСТАННЯ КОГЕНЕРАЦІЙНИХ УСТАНОВОК ДЛЯ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ. The materials of the conference 5th International Scientific and Practical Conference «Science And Information Technologies in The Modern World». Collection of Scientific Papers. February 11-13, 2026 Athens, Greece. Стр. 420 – 422.
53. Можливості підвищення енергоефективності теплових мереж шляхом впровадження когенерації / С. Ю. Андреев, В. А. Маляренко, І. О. Темнохунд, О. В. Сенецький // Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. Вісник НТУ «ХПІ» : 36. наук. праць. – Харків : НТУ «ХПІ», 2015. – № 17(1126). – С. 147–155. – ISSN 2078-774X.
54. <http://dieselmash.com.ua/produksiya/dvigatel-generatory/kogeneratsionnye-ustanovki>.
55. <https://www.jenbacher.com/en/gas-engines/type-3/j312>.
56. International Energy Agency (IEA). Ukraine's energy system under attack – Ukraine's energy security and the coming winter. Paris: IEA, 2024. Енергетична система України під атакою – Енергетична безпека України та майбутня.
57. Ганжа А. М., Підкопай В. М., Темченко І. М. Комплексний аналіз систем теплопостачання на всіх етапах від джерела до споживача // MicroCAD–2017 : тези доповідей 25-ї міжнар. наук.-практ. конф. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – С. 250.
58. Ганжа А. М., Підкопай В. М., Немцев Е. М. Раціональні параметри теплоносія від джерела у системі теплопостачання з урахуванням фактичних характеристик обладнання // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2017. – № 2(48). – С. 76–81. – <https://doi.org/10.20535/1813-5420.2.2017.111686>.
59. Гламаздін П. М., Баранчук К. О., Приймак О. В. Нові підходи до організації централізованого теплопостачання // Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання. – 2021. – № 39. – С. 38–46. – DOI: 10.32347/2409-2606.2021.39.38-46.
60. Zhang J., et al. Reducing heat losses from aging district heating pipes by

using cured-in-place pipe liners // Energy. 2023. Vol. 273. Art. 127260.

Зменшення втрат тепла зі старіючих труб централізованого теплопостачання шляхом використання трубопровідних вкладишів, що тверднуть на місці. DOI 10.1016/j.energy.2023.127260.

61. Котел водогрійний водотрубно-димогарний теплопродуктивністю 0,63 МВт (КВВД-0,63 Гн). Проблеми екології та експлуатації об'єктів енергетики: Збірник праць /Інститут промислової екології. — Київ: ІВЦ АЛКОН НАН України, 2022. С. 271-272.

62. A data-driven method for heat loss estimation from district heating service pipes using heat meter- and GIS data // Energy. 2023. Vol. 277. Art. 127713. DOI: 10.1016/j.energy.2023.127713.

Метод оцінки втрат тепла з труб централізованого теплопостачання на основі даних, що використовує дані лічильників тепла та ГІС.

63. International Energy Agency (IEA). Global annual heat deliveries to end-use sectors through district heating networks, 2000–2021. IEA Data & Statistics. Paris: IEA, 2022.

Міжнародне енергетичне агентство (МЕА). Щорічні світові постачання тепла кінцевим споживачам через мережі централізованого теплопостачання

64. Директива 2010/75/ЄС Європейського Парламенту та Ради від 24 листопада 2010 забруднень)». <https://eur-lex.europa.eu/legalcontent/EN/TXT/?uri=celex%3A32010L0075>.

65. Lund H., Duic N., Østergaard P. A., Mathiesen B. V. Future district heating systems and technologies: On the role of smart energy systems and 4th generation district heating // Energy. – 2018. – Vol. 165 (Pt A). – P. 614– 619. – DOI: 10.1016/j.energy.2018.09.115.

Системи та технології централізованого теплопостачання майбутнього:

66. Про житлово-комунальні послуги: Закон України ід 09.11.2017 №2189-VIII.

67. Басок Б. І., Базєєв Є. Т. Енергоефективність теплопостачання як вимога

безпеки життєдіяльності // Актуальні питання енергозбереження як вимога безпеки життєдіяльності : матеріали Міжнар. наук.-практ. конф.— Київ : Основа, 2018. — С. 253–258.

68. Pipeline insulation optimization in district heating networks // Energy. 2025. Vol. 340. Art. 139166. DOI: 10.1016/j.energy.2025.139166.

Оптимізація ізоляції трубопроводів у мережах централізованого теплопостачання.

69. Борисов М.А. Реабілітація ТЕС. Забезпечення сталої роботи об'єднаної енергосистеми України /Енергетика и электрификация. — 2004. — № 3. — С. 2–3.

70. А. Мазуренко, О. Климчук, Г. Лужанська, П. Іванов, І. Сергєєв. Забезпечення підвищення надійності та ефективності систем теплопостачання за рахунок використання мікротурбін в умовах нестабільного енергоживлення, Праці Одеського політехнічного університету, Вип. 2(66), 2022, ISSN 2076-2429 с. 58-64.

71. Аналіз стану котельного господарства України з метою модернізації, продовження ресурсу чи заміни котлів малої і середньої потужності. І.Я. Сігал, Е.П. Домбровська, А.В. Смухіна та ін. /Экотехнологии и ресурсосбережение. — 2003. — №6. — С.76–79.

72. Musbaudeen O. Bamgbopa Modeling and performance evaluation of an Organic Rankine Cycle (ORC) with R245fa as working fluid: degree of Master's of Science / Musbaudeen Oladiran Bamgbopa. — Northern Cyprus Campus, 2012. — 79 p.

73. Стаднік М. І. Методика формування складу та вибору потужності когенераційних генераторних установок для забезпечення автономного енергопостачання об'єктів АПК // Техніка, енергетика, транспорт АПК. - Вінниця.

74. European Energy Security Strategy: Strategy of 28.05.2014 no. 52014DC0330. European Commission. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:52014DC0330>. (дата звернення: 24.07.2023)

75. Mazurenko, A., Pustovit, A., Shylov, P., Shylov, D. i Stanislavov, V. 2025. Визначення ймовірності відмов в роботі елементів систем міського теплопостачання.

чання в екстремальних умовах експлуатації. Праці Одеського політехнічного університету. 1(71) (Чер. 2025), 98–103. DOI: <https://doi.org/10.15276/opu.1.71.2025.11>.

76. Kumamoto H., Henley E.J. Safet and Reliability Synthesis of Systems with Control Loops. AIChE Journal. 1979. Vol. 25, No. 1. P. 108.

77. Klimenko V. Prospects for application of cogeneration technologies in municipal energy. Thermophysics and Thermal Power Engineering. 2018. Vol. 40, No. 3. P. 32–37. DOI: <https://doi.org/10.31472/ihe.3.2018.05>.

78. Порядок погодження Мінрегіоном схем теплопостачання населених пунктів з кількістю жителів більш як 20 тисяч осіб та регіональних програм модернізації систем теплопостачання: Наказ Мінрегіону від 08.08.2012 № 403. URL: <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1474-12>.

79. Куртов А. І., Полікашин О. В., Потіхенський А. І., Александров В. М. Метод «Делфі» як технологія прийняття управлінських рішень. Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. 2017. № 1. С. 118–122.

80. Small and medium cogeneration in district heating systems in Ukraine: potential and benefits. USAID ESP: official site. 2023. 25 May. URL: <https://energysecurityua.org/blogs/small-and-medium-cogeneration-in-district-heating-systems-in-ukraine-potential-and-benefits/>.

81. Андрєєв С.Ю., Маляренко В.А., Темнохуд І.О. Немировський І.А. Когенерація у муніципальній енергетиці // Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит, 2015. № 2(133). С. 15-24. ISSN 2218-1849.

82. Маляренко В.А., Казарова І.О., Сенецький О.В., Темнохуд О.О. Дослідження впровадження газопоршневих та газотурбінних двигунів при переведенні котельні в режим когенерації // Енергетика теплотехнології та енергозбереження, – 2019. – № 2. – С. 3-10.

83. Breeze P. Combined Heat and Power Generation. - Elsevier, 2018. - 104 p.

84. Klymchuk, O. i Pozdniakova, G. 2024. Підвищення надійності роботи систем теплопостачання в умовах відключення електроенергії. Праці Одеського політехнічного університету. 2(70) (Груд. 2024), 48–54. <https://doi.org/10.15276/opu.2.70.2024.06>.

85. Горобець В.Г., Богдан Ю.О., Троханяк В.І. Теплообмінне обладнання для когенераційних установок: [Монографія]. – К.: «ЦП «Компринт», 2017. – 198 с.
86. Погорєлов, А. І. Тепломасообмін (основи теорії і розрахунку) : навч. посібник / А. І. Погорєлов. - 4-е вид., випр. - Львів : Новий світ, 2000, 2006. – 144 с.
87. Розрахунок теплообмінних апаратів: навч. посіб. Для студентів спеціальності 144 «Теплоенергетика», Укладачі: І.О. Назарова, Н.О. Притула; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – 2020. – 51 с.
88. Гічов Ю.О., Бойко В.М., Адаменко Д.С. Котли-утилізатори та їх тепловий розрахунок: Навч. посібник. – Дніпропетровськ: НМетАУ, 2004. – 46. с.
89. Безродний М. К. Термодинамічна та енергетична ефективність теплонасосних схем тепlopостачання: монографія / М.К. Безродний, Н. О. Притула// НТУУ «КПІ» Вид-во«Політехніка». - 2016. – С. 44-165.
90. Снежкін Ю.Ф., Чалаєв Д.М., Шаврін В.С., Дабіжа Н.О. Теплові насоси в системах теплохолодопостачання [монографія]// під ред. акад. НАН України А.А. Долінського; НАН України, Ін-т техн. теплофізики. К.: [б. в.], 2008. 104 с.
91. Denysova A.E., Klymchuk O.A., Ivanova L.V., Zhaivoron O.S. Energy Efficiency of Heat Pumps Heating Systems at Subsoil Waters for South-East Regions of Europe//Probleme le energeticii regionale 4 (48) 2020. P.78-89. – Режим доступу: <https://journal.ie.asm.md/ru/contents/electronni-jurnal-448-2020> .
92. Rosen M. A., Koohi-Fayegh S. Cogeneration and District Energy Systems: Modelling, Analysis and Optimization. - London: IET, 2016. - 360 p.
93. Режимна карта водогрійного котла ПТВМ-50 № 1, рег. № 4742 котельні «Південна-1», м. Одеса, 2023 р.
94. Когенераційні установки JENBACHER. Технічні характеристики. URL: <https://www.kts-eng.com/product/jenbacher-j412-b09/> (дата звернення 17.02.2025).
95. Завантаження історичних даних про погоду. URL: <https://www.meteoblue.com/uk/weather/archive/export> (дата звернення 15.02.2025).

96. Matan Shnaiderman, Nir Keren. Cogeneration versus natural gas steam boiler: A techno-economic model // *Applied Energy*. - 15 October 2014, Volume 131, - p. 128-138.

97. Пустовіт А.В. Забезпечення живучості міських систем опалення. XXXIII міжнародна науково-практична конференція. MicroCAD-2025, (14-17 травня 2025), Харків .

98. Теплозабезпечення великих міст України: поточний стан і напрями модернізації : кол. моногр. / за ред. М. О. Кизима, Є. І. Котлярова; авт. кол. : Ки-зим М. О., Котляров Є. І., Хаустова В. Є., Салашенко Т. І., Красноносова О. М., Костенко Д. М., Крячко Є. М., Пономаренко Є. В., Рудика О. В., Хаустов М. М. Харків : ФОП Лібуркіна Л. М., 2021. 340 с.

https://ndcipr.org/media/publications/files/%D0%A2%D0%B5%D0%BF%D0%BB%D0%BE%D0%B7%D0%B0%D0%B1%D0%B5%D0%B7%D0%BF%D0%B5%D1%87%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D1%8F_%D0%BC%D0%BE%D0%BD%D0%BE.pdf.

99. Відновлювані джерела енергії / За заг. ред. С.О. Кудрі. – Київ: Інститут відновлюваної енергетики НАНУ, 2020. – 392 с

100. Енергетичний потенціал сонячної радіації на території України/ В. М. Желих, О. В. Омельчук, С. П. Шаповал, І. І. Венгрин // *Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Теорія і практика будівництва*. - 2015. - № 823. - С. 117-121. - http://nbuv.gov.ua/UJRN/VNULPTPB_2015_823_21

101. Возняк О.Т., Янів М.Є. Енергетичний потенціал сонячної енергетики та перспективи його використання в Україні // *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. Львів, 2010. № 664. С. 7–10.

102. Лужанська Г.В., Сергеев М.І., Чумаченко А.М., Климчук І.О., Михайленко М.С. Потенціал сонячної енергетики в Україні. Proceedings of the XXIII International Scientific and Practical Conference “World ways and methods of improving outdated theories and trends” (June 11 – 14, 2024) Zagreb, Croatia. International Science Group. 2024. Pp. 368-370

103. Климчук, О., Лужанська, Г., Жайворон, О., Грищенко, С., & Каверін, А. (2024). Аналіз ефективності застосування різних типів сонячних систем для сезонних споруд санаторного та рекреаційного типу. *Refrigeration Engineering and Technology*, 60(4). <https://doi.org/10.15673/ret.v60i4.3074>.

104. Денисюк В. Ю. Автономні гібридні системи енергопостачання з використанням відновлювальних джерел енергії / В. Ю. Денисюк, В. С. Оленіч. // Перспективні технології та прилади. – С. 29–33.

105. Комбіновані фотоенергетичні системи : [монографія] / Р. В. Зайцев, Г. С. Хрипунов, М. В. Кіріченко, А. В. Меріуц ; Нац. техн. ун-т "Харківський політехнічний інститут". – Харків : [ФОП Бровін О. В.], 2020. – 323 с.

106. Лежнюк П. Д. Фотоелектричні станції як елемент енергоефективного електропостачання / П. Д. Лежнюк, С. В. Кравчук, І. В. Котилко // Оптико–електронні інформаційно–енергетичні технології. – 2019. – № 2. – С. 100–106.

107. Андропова О. В. Оптимізація розміщення приймачів сонячної енергії рядами для кліматичних умов півдня України / О. В. Андропова, В. В. Курак // Відновлювана енергетика. – 2020. – № 2. – С. 45–53.

108. Babaev, E. Pozdniakova, G. 2023. Аналіз ефективності застосування геоліосистем в централізованих системах теплопостачання університету. *Праці Одеського політехнічного університету*. 2(68) (Груд 2023), 64–71.

<https://doi.org/10.15276/opu.2.68.2023.08>.

109. Пундєв В. О., Шевчук В. І., Хілько В. А., Мухуб Б. Особливості проектування фотоелектричних станцій, що розміщуються на дахах та стінах будівель. *Відновлювана енергетика*. 2017. № 3. С. 41-47. URL: <http://jnas.nbu.gov.ua/article/UJRN-0000954190>.

110. Лужанська, Г., Шевчук, В., Шилов, Д., Кандєєва, В., & Фуркаленко, О. (2025). Ефект енергоаудиту від застосування САПР-технологій в інноваційних системах сонячного енергозабезпечення. *Refrigeration Engineering and Technology*, 61(3). <https://doi.org/10.15673/ret.v61i3.3273>.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Наукові праці, в яких опубліковано наукові результати дисертації:

1. Babaev, E. Pozdniakova, G. 2023. Аналіз ефективності застосування геліо-систем в централізованих системах тепlopостачання університету. Праці Одеського політехнічного університету. 2(68) (Груд. 2023), 64–71.

<https://doi.org/10.15276/opu.2.68.2023.08>.

(Реєстр наукових фахових видань України, категорія «Б»).

2. Mazurenko, A., Klymchuk, O., Pozdniakova, G., Pustovit, A. i Shavrov, V. 2024. Проблеми забезпечення надійного тепlopостачання в умовах негарантованого електропостачання теплогенеруючим підприємствам. Праці Одеського політехнічного університету. 1(69) (Трав. 2024), 23–31.

<https://doi.org/10.15276/opu.1.69.2024.03>.

(Реєстр наукових фахових видань України, категорія «Б»).

3. Г.І. Позднякова, Є.С. Бабаєв. Шляхи підвищення енергоефективності тепlopостачання районів міст за рахунок комплексної модернізації інженерних систем будівель. Refrigeration Engineering and Technology. Том 60 № 1 (2024), 45-52.

<https://journals.ontu.edu.ua/index.php/reftech/article/view/2735/3156>

4. Klymchuk, O. i Pozdniakova, G. 2024. Підвищення надійності роботи систем тепlopостачання в умовах відключення електроенергії. Праці Одеського політехнічного університету. 2(70) (Груд. 2024), 48–54.

<https://doi.org/10.15276/opu.2.70.2024.06>.

(Реєстр наукових фахових видань України, категорія «Б»).

5. Anton Mazurenko, Anton Panda, Oleksandr Klymchuk, Ganna Pozdniakova, Anatoliy Pustovit, Jan Valicek, Marta Harnicarova. Stability of systems in extreme operating conditions. Mm science journal i 2025 i november. P 8916-8920.

https://doi.org/10.17973/MMSJ.2025_11_2025037

(Реєстр міжнародних наукометричних видань Scopus).

Опубліковані праці апробаційного характеру:

6. Лужанська Г.В. Бабаєв Є.С. Сергєєв М.І. Позднякова Г.І. Климчук І.О. Аналіз сучасного стану енергопостачання для комунальної енергетики в загальному енергетичному балансі країни. 9th International Scientific and Practical Conference THEORY AND PRACTICE OF SCIENCE: KEY ASPECTS ROME, ITALY February 19-20, 2024. p. 496-502.

<https://doi.org/10.51582/interconf.19-20.02.2024>

7. Климчук О. А., Позднякова Г. І. МОДЕРНІЗАЦІЯ ТЕПЛОВИХ МЕРЕЖ У ПОВОЄННИЙ ПЕРІОД. ПРОБЛЕМИ ЕКОЛОГІЇ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЇ ОБ'ЄКТІВ ЕНЕРГЕТИКИ. XXXIV міжнародна конференція “Проблеми екології і експлуатації об'єктів енергетики”. Збірник праць. ІВЦ АЛКОН. Київ 2024. стор.50-53.

https://ittf.kiev.ua/wp-content/uploads/2025/01/sbornik_2024_pp.pdf

8. Сігал О. І., Падерно Д. Ю., Позднякова Г. І. ЗАХОДИ З ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ РОБОТИ ТЕПЛОДЖЕРЕЛ СИСТЕМИ ЦЕНТРАЛІЗОВАНОГО ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ МІСТА ОДЕСИ В УМОВАХ ВОЄННОГО СТАНУ. XXXIV міжнародна конференція “Проблеми екології і експлуатації об'єктів енергетики”. Збірник праць. ІВЦ АЛКОН. Київ 2024. стор.65-68.

https://ittf.kiev.ua/wp-content/uploads/2025/01/sbornik_2024_pp.pdf

9. Позднякова Г.І. ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ СИСТЕМИ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ. 3rd International Scientific and Practical Conference «Modern Trends in the Development of Economy, Technology and Industry» Collection of Scientific Papers April 9-11, 2025 Toronto, Canada. стор. 307-311.

<https://doi.org/10.70286/ISU-09.04.2025>

10. Климчук О.А., Позднякова Г.І. ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ У СИСТЕМАХ КОМБІНОВАНОГО ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ. Тези доповідей XXXIII МІЖНАРОДНОЇ НАУКОВО-ПРАКТИЧНОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ: НАУКА, ТЕХНІКА, ТЕХНОЛОГІЯ, ОСВІТА, ЗДОРОВ'Я

MicroCAD- 2025. Національний університет «Одеська політехніка», м. Одеса стор. 760.

<https://ndch.kpi.kharkov.ua/wp-content/uploads/2025/06/Zbirnik-tez-2025.pdf>

11. Климчук О.А., Позднякова Г.І. ВИКОРИСТАННЯ КОГЕНЕРАЦІЙНИХ УСТАНОВОК ДЛЯ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ. The materials of the conference 5th International Scientific and Practical Conference «Science And Information Technologies in The Modern World». Collection of Scientific Papers. February 11-13, 2026 Athens, Greece. стор. 420 – 422.

<https://doi.org/10.70286/ISU-11.02.2026>

Публікації, які додатково відображають наукові результати дисертації.

2. Г.І. Позднякова, О.І. Сігал, Д.Ю. Падерно. Теплопостачання міста Одеси. Монографія. Київ. Наукова думка. 2024. 224 стор. ISBN 978-966-00-1919-5

**ДОВІДКА**

про виконання результатів дисертаційної роботи

Позднякової Ганни Іванівни

представленої на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю

144 – Теплоенергетика

Надана довідка затверджує, що дисертаційне дослідження Позднякової Г.І. «Підвищення ефективності та надійності роботи систем централізованого теплопостачання в комунальній теплоенергетиці» використовується Національним університетом «Одеська політехніка» при підготовці здобувачів першого рівня вищої освіти (бакалавр) за освітньо-професійною програмою «Теплоенергетика та менеджмент енергозбереження», здобувачів другого рівня вищої освіти (магістр) за освітньо-професійною програмою «Теплові електричні станції та інноваційні енергетичні технології» та здобувачів третього рівня вищої освіти за освітньо-науковою програмою «Теплоенергетика» на кафедрі теплових електростанцій та енергозберігаючих технологій Національного університету «Одеська політехніка» в дисциплінах: «Теплопостачання підприємств», «Технічні системи та обладнання галузі», «Надійність експлуатації та безпека енергопідприємств».

Довідка надана у зв'язку з захистом дисертації.

Перший проректор

Сергій НЕСТЕРЕНКО

Кандеева Віра 705-85-07

**ДОВІДКА**

про виконання результатів дисертаційної роботи

Позднякової Ганни Іванівни

представленої на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю

144 – Теплоенергетика

Надана довідка затверджує, що дисертаційне дослідження Позднякової Г.І. «Підвищення ефективності та надійності роботи систем централізованого теплопостачання в комунальній теплоенергетиці» виконане відповідно до планів, затверджених Міністерством освіти і науки України, і є складовою частиною НДР № 179-41 за темою «Забезпечення ефективного функціонування систем теплопостачання будівель громадського призначення теоретико-методологічні та практичні аспекти» (№ 0119U003518); НДР № 266-41 за темою "Підвищення надійності систем теплопостачання об'єктів критичної інфраструктури." (№ 0125U003952); міжнародним грантовим проєктом № DRP0401077 «Впровадження Зеленої Економіки для комунальних систем опалення шляхом інтеграції відновлюваних джерел енергії (Greening Communal Heating Systems by Integrating Renewables)» в рамках міжнародної програми «INTERREG DANUBE REGION SMF» сумісно с партнерами «Інститутом інтелектуальних технологій Кемпелен; KInIT; (Kempelen Institute of Intelligent Technologies); Братислава, Словаччина; компанія ЗСЕ Енергія; ZSE E; ZSE Energia; Братислава, Словаччина.

Проректор

Дмитро ДМИТРИШИН

Кандеєва Віра 705-85-07



УКРАЇНА

КОМУНАЛЬНЕ ПІДПРИЄМСТВО ТЕПЛОВИХ МЕРЕЖ

«ТЕРНОПІЛЬМІСЬКТЕПЛОКОМУНЕНЕРГО»

ТЕРНОПІЛЬСЬКОЇ МІСЬКОЇ РАДИ

46001, м. Тернопіль, вул. Франка, 16; тел./факс (0352) 25-25-39 E-mail: tmtke@ukr.netВих. № 1142/1
"24" 06 2026 р.

ДОВІДКА

про впровадження результатів дослідження дисертаційної роботи
на здобуття наукового ступеня доктор філософії
за спеціальністю 144 — «Теплоенергетика»

Позднякової Ганни Іванівни

«Підвищення ефективності та надійності роботи систем централізованого
теплопостачання в комунальній теплоенергетиці»

Довідка видана в тому, що у діяльності комунального підприємства теплових мереж «Тернопільмиськтеплокомуненерго» Тернопільської міської ради застосовані результати наукового дослідження здобувача 3-го рівня освіти (доктор філософії) кафедри теплових електростанцій та енергозберігаючих технологій Національного університету «Одеська політехніка» Позднякової Ганни Іванівни.

В роботі «Підвищення ефективності та надійності роботи систем централізованого теплопостачання в комунальній теплоенергетиці» запропоновано нові підходи щодо енергозабезпечення систем централізованого теплопостачання які здатні суттєво підвищити ефективність використання первинних енергоресурсів та забезпечити надійне енергопостачання під час аварійних відключень від центральних мереж електропостачання. Розроблені рішення на основі впровадження когенераційних установок в системи централізованого теплопостачання дозволяють як підвищити надійність енергопостачання джерел теплоти так і привести до зменшення експлуатаційних витрат на електропостачання та теплопостачання споживачів підприємства, а також підвищити коефіцієнт використання палива в системі енергопостачання підприємств. Особливу цінність результати дослідження набувають за рахунок широкого випробування представлених рішень на практиці.

Очікувана економія коштів на енергоресурси складає 10-15 %.

Директор

А.К.Чумак



МЕ «ЗТКЕ»
of the Zhytomyr City Council

48 Kyivska str., Zhytomyr
10014, Ukraine
tel.: +38(0412) 471930, 471933, 471928
teplo@teplo.net.zt.ua EDRPOU 35343771



КП «ЖТКЕ»
Житомирської міської ради

вул. Київська 48, м. Житомир
10014, Україна
тел.: +38(0412) 471930, 471933, 471928
teplo@teplo.net.zt.ua ЄДРПОУ 35343771

АКТ

впровадження результатів науково-дослідницької

Отримані результати теоретичних та експериментальних досліджень, виконаних в дисертаційній роботі Позднякової Ганни Іванівни на тему «Підвищення ефективності та надійності роботи систем централізованого теплопостачання в комунальній теплоенергетиці» на кафедрі теплових електростанцій та енергозберігаючих технологій Національного університету «Одеська політехніка», були впровадженні на наступних об'єктах:

- «Реконструкція системи електропостачання котельні РК-6 з влаштуванням точки підключення когенераційної блочно-модульної установки Jenbacher JMC 320 GS-N.L. за адресою: вул. Жуйка, 12 в м. Житомир».
- «Реконструкція системи електропостачання котельні РК-8 з влаштуванням точки підключення когенераційної блочно-модульної установки Jenbacher JMC 312 GS-B.L. за адресою: просп. Миру, 22к в м. Житомир».

Впровадження розроблених в дисертаційній роботі схемних рішень та рекомендацій, щодо підвищення ефективності та надійності енергопостачання підприємства дозволило забезпечити стійкість електропостачання при аварійних ситуаціях та отримати економію коштів на енергоресурсів у межах 25,7 % від загального їх споживання по підприємству.

Директор

Вик. Андрій Собченко
063-148-15-09



Дмитро РОГОЖИН