

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ “ОДЕСЬКА ПОЛІТЕХНІКА”
МІНІСТЕРСТВА ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ “ОДЕСЬКА ПОЛІТЕХНІКА”
МІНІСТЕРСТВА ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ЛЯШЕНКО ВЛАДИСЛАВ ІГОРОВИЧ

УДК 621.311.4:697.34

ДИСЕРТАЦІЯ

**ЕФЕКТИВНІСТЬ МІСЬКИХ СИСТЕМ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ В
УМОВАХ ДЕФІЦИТУ ЕНЕРГОРЕСУРСІВ**

Спеціалізація 144 – Теплоенергетика

Галузь знань 14 – Електрична енергетика

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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

_____ В. І. Ляшенко

Науковий керівник: Баласанян Геннадій Альбертович
доктор технічних наук, професор

Одеса – 2026

АНОТАЦІЯ

Ляшенко В. І. Ефективність міських систем теплопостачання в умовах дефіциту енергоресурсів. – Кваліфікаційна праця на правах рукопису.

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

Дисертаційне дослідження присвячене розв’язанню актуальної науково-прикладної проблеми підвищення ефективності й керованості міських систем централізованого теплопостачання в умовах дефіциту паливно-енергетичних ресурсів. Актуальність теми зумовлена зношеністю теплових мереж і теплових пунктів, високою залежністю теплопостачання від обмежених ресурсів та відсутністю комплексних методів керування, які одночасно враховують гідравлічні обмеження мережі та соціальну пріоритетність споживачів.

У вступі обґрунтовано доцільність переходу від традиційних статичних схем регулювання теплових мереж до інтегрованих моделей управління, що поєднують гідравлічне балансування з пріоритетним розподілом теплової енергії. Показано, що в умовах дефіциту ресурсів класичні методи регулювання витрати і температури не забезпечують ні стабільності роботи системи, ні гарантованого теплопостачання соціально значущих об’єктів.

Об’єктом дослідження є міські системи централізованого теплопостачання з розгалуженою мережею споживачів, що працюють в нерівномірних гідравлічних режимах.

Предмет охоплює методи гідравлічного та теплового моделювання й алгоритми регулювання витрати теплоносія та пріоритетного розподілу теплової енергії в умовах дефіциту.

Метою роботи є розробка та апробація алгоритму пріоритетного регулювання теплопостачання, який базується на розділенні гідравлічного і теплового балансів та забезпечує керований розподіл теплової енергії між різними категоріями споживачів.

Для реалізації поставленої мети вирішено такі основні завдання: виконано збір, систематизацію та аналіз вихідних даних; виконано моделювання гідравліки теплової мережі з визначенням сумарних опорів і режимів роботи споживачів; розроблено модель теплового розподілу та алгоритм пріоритетного регулювання з урахуванням сценаріїв дефіциту; здійснено моделювання роботи регулюючої арматури при малих навантаженнях; проведено порівняльний аналіз варіантів модернізації елеваторних вузлів з переходом на індивідуальні теплові пункти.

Методологія дослідження ґрунтується на поєднанні класичних методів гідравлічного розрахунку тепломереж з аналітичними залежностями для турбулентної течії й математичним моделюванням режимів роботи регулюючої арматури, а також з алгоритмічними методами оптимального розподілу теплової енергії за умов дефіциту потужності. Для реалізації моделей і обробки результатів використано інженерні розрахункові таблиці та програмні засоби (зокрема Excel).

У першому розділі виконано аналітичний огляд сучасного стану централізованого теплопостачання, методів гідравлічного балансування та підходів до пріоритетного регулювання теплових навантажень. Показано, що більшість відомих підходів розглядають гідравлічні й теплові задачі окремо, що обмежує їхню прикладну цінність.

У другому розділі розроблено й апробовано алгоритм гідравлічного балансування мережі на прикладі центрального теплового пункту. Визначено еквівалентні гідравлічні опори споживачів, ідентифіковано критичні ділянки мережі та найбільш уразливі об'єкти з точки зору забезпечення необхідного напору.

Третій розділ присвячено розробці алгоритму пріоритетного розподілу теплової енергії. Запропоновано математичний апарат, який враховує класи споживачів, коефіцієнти дефіциту, модератор навантаження та процедуру нормалізації, що гарантує збереження загального теплового балансу. Показано,

що цей алгоритм дозволяє захистити дрібні й соціально значущі об'єкти від витіснення великими споживачами в умовах обмеженого ресурсу.

У четвертому розділі проаналізовано режими роботи комбінованих регулюючих клапанів при малих теплових навантаженнях. Моделювання доводить, що за таких умов комбіновані клапани працюють поза зоною стабільного регулювання через недостатню витрату теплоносія. Запропоновано альтернативу у вигляді модульного регулюючого вузла з мембранним регулятором перепаду тиску і електроприводом, який забезпечує незалежне від тиску регулювання витрати для споживачів з невеликим навантаженням.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у наступному:

1. Вперше запропоновано математичний підхід до пріоритетного розподілу теплової енергії в централізованих мережах, що поєднує гідравлічний і тепловий баланс із урахуванням коефіцієнтів дефіциту, топології мережі та пріоритетів споживачів.
2. Вперше узагальнено модель роботи комбінованих регулюючих клапанів у режимах малих теплових навантажень, що враховує нелінійність витратної характеристики, залежність пропускної здатності від перепаду тиску і межі стабільності регулювання.
3. Удосконалено методику гідравлічного моделювання теплових мереж з урахуванням реальної топології та режимів експлуатації, що дозволяє коректно оцінювати роботу споживачів з низькою витратою теплоносія та виявляти ділянки з недостатнім тиском.
4. Розроблено нову методику переходу від елеваторного вузла до індивідуального теплового пункту, яка описує змішування потоків, утворення перепадів тиску та роботу регулюючого клапана у широкому діапазоні режимів.
5. Вперше встановлено критичні умови, за яких комбіновані регулятори не забезпечують стабільної витрати на малих споживачах; це дозволило визначити межі їх застосування та сформулювати рекомендації щодо вибору регулювальної арматури.

6. Розроблено алгоритм вибору типорозміру і налаштувань регулюючого клапана при заміні елеваторного вузла, що враховує реальні робочі перепади тиску та теплові навантаження.

Практичне значення роботи полягає у можливості безпосереднього використання розроблених моделей, алгоритмів і рекомендацій при модернізації та проєктуванні систем теплопостачання. Зокрема, розроблена гідравлічна модель мережі може застосовуватися теплопостачальними підприємствами для аналізу режимів роботи і виявлення вузлів із недостатнім тиском та пріоритетних споживачів в умовах дефіциту потужності. Пропонований алгоритм пріоритетного розподілу теплової енергії може бути інтегрований у SCADA-системи для автоматичного коригування теплових навантажень на основі реальних параметрів мережі.

Методика підбору комбінованих регуляторів дозволяє уникнути помилок при виборі обладнання, особливо для малих споживачів, де стандартні клапани можуть працювати поза зоною стабільного регулювання. Розроблені моделі індивідуальних теплових пунктів застосовні при модернізації елеваторних вузлів, а рекомендації щодо оптимальних параметрів витрати, перепаду тиску та типорозмірів клапанів сприяють підвищенню енергоефективності та надійності роботи мереж.

Отримані результати були використані в освітньому процесі підготовки фахівців з теплоенергетики.

Ключові слова: система централізованого теплопостачання, гідравлічне моделювання, теплове моделювання, пріоритетний розподіл теплової енергії, дефіцит енергоресурсів, гідравлічне балансування, перепад тиску, витрата теплоносія, комбіновані регулятори, регулятор перепаду тиску, індивідуальний тепловий пункт, елеваторний вузол, енергоефективність.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ
Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Г. Баласанян і В. Ляшенко, Сучасні методи регулювання міських систем теплопостачання в умовах дефіциту енергоресурсів, RET, vol 61, no 3, pp 284-290, Вер 2025.

<https://doi.org/10.15673/ret.v61i3.3213>

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

2. Г. А. Баласанян, В. І. Ляшенко. Пріоритетне регулювання систем теплопостачання з урахуванням гідравлічного балансування. Праці Одеського політехнічного університету 2(72) (Жов 2025), 36-46.

<https://doi.org/10.15276/opu.2.72.2025.04>

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

3. Г. Баласанян і В. Ляшенко, Моделювання режимів роботи регуляторів витрати теплоносія в умовах локальних теплових, RET, vol 61, no 4, Груд 2025.

<https://doi.org/10.15673/ret.v61i4.3329>

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

4. Г. Баласанян і В. Ляшенко, Методика розрахунку та проектування індивідуальних теплових пунктів при реконструкції елеваторних вузлів, RET, vol 62, no 1, Бер 2026.

<https://doi.org/10.15673/ret.v62i1.3388>

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

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

5. Баласанян Г. А., Крапива Н. В., Семеній А. А., Саченко Л. В., Ляшенко В. І. «Оптимізація параметрів та режимів роботи бака-акумулятора тепла системи 10 електричного опалення в переривчатому режимі». Міжнародна наукова конференція «Інформаційне суспільство: технологічні,

економічні та технічні аспекти становлення (випуск 80)», Польща, 19-20 вересня 2023. С. 177-182.

<http://www.konferenciaonline.org.ua/ua/article/id-1275/>

6. Генадій Баласанян, Артем Остапенко, Владислав Ляшенко. «Узгодження графіків електричного і теплового навантаження комбінованої системи енергозабезпечення». Сучасні технології біомедичної інженерії. III МНТК, 08-10 травня 2024 р., Нац. ун-т «Одеська політехніка». С. 271-273

<https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/book/830>

7. Генадій Баласанян, Артем Остапенко, Владислав Ляшенко. «Комбінованих систем енергозабезпечення на базі газотурбінної когенераційної установки та вітрогенератора». Матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції «Old and new technologies of learning development in modern conditions», 13-16 лютого 2024 р., Берлін, Німеччина. С. 297-301

<https://isg-konf.com/old-and-new-technologies-of-learning-development-in-modern-conditions/>

8. Генадій Баласанян, Владислав Ляшенко. «Сучасні методи регулювання міських систем теплопостачання в умовах дефіциту енергоресурсів». Матеріали XVII Міжнародної науково-практичної конференції «Development of science through the latest technologies and theories» 23-26 грудня 2025 р., Мілан, Італія. С. 102-106.

<https://isg-konf.com/development-of-science-through-the-latest-technologies-and-theories/>

9. Генадій Баласанян, Владислав Ляшенко. «Методика гідравлічного розрахунку теплової мережі». Матеріали II Міжнародної науково-практичної конференції «Development of new technologies and their impact on infrastructure», 13-16 січня 2026 р., Краків, Польща. С. 47-50.

<https://isg-konf.com/development-of-new-technologies-and-their-impact-on-infrastructure/>

10. Генадій Баласанян, Владислав Ляшенко. «Моделювання роботи регулюючого вузла АРРQMP у складі центрального теплового пункту». Матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції «Implementation of modern technologies and their impact on industry», 27-30 січня 2026 р., Париж, Франція. С. 42-48.

<https://isg-konf.com/implementation-of-modern-technologies-and-their-impact-on-industry/>

ABSTRACT

Liashenko V. I. Efficiency of urban district heating systems under energy resource deficit conditions. – Qualification work submitted as 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.

The dissertation research is devoted to solving a relevant scientific and applied problem of increasing the efficiency and controllability of urban district heating systems under conditions of fuel and energy resource deficit. The relevance of the topic is due to the wear and tear of heating networks and heating points, the high dependence of heat supply on limited resources, and the lack of comprehensive control methods that simultaneously take into account the hydraulic limitations of the network and the social priority of consumers.

The introduction substantiates the feasibility of transitioning from traditional static control schemes of heating networks to integrated management models that combine hydraulic balancing with priority-based heat distribution. It is shown that under resource deficit conditions, classical methods of flow rate and temperature control ensure neither system stability nor guaranteed heat supply to socially significant facilities.

The object of research is urban district heating systems with a branched network of consumers operating under non-uniform hydraulic conditions.

The subject of research includes methods of hydraulic and thermal modeling and algorithms for regulating coolant flow and priority-based heat distribution under deficit conditions.

The purpose of the study is to develop and validate a priority-based heat supply control algorithm based on the separation of hydraulic and thermal balances, ensuring controlled distribution of thermal energy among different categories of consumers.

To achieve this goal, the following main tasks were solved: collection, systematization, and analysis of initial data; construction of a hydraulic model of the heating network with determination of total resistances and operating modes of consumers; development of a thermal distribution model and a priority control algorithm considering deficit scenarios; simulation of control valve operation under low loads; and comparative analysis of modernization options for elevator units with transition to individual heat substations.

The research methodology is based on the combination of classical methods of hydraulic calculation of heating networks with analytical relationships for turbulent flow and mathematical modeling of control valve operating modes, as well as algorithmic methods for optimal heat distribution under power deficit conditions. Engineering calculation tables and software tools (including Excel) were used to implement the models and process the results.

The first chapter provides an analytical review of the current state of district heating, hydraulic balancing methods, and approaches to priority regulation of heat loads. It is shown that most known approaches consider hydraulic and thermal problems separately, which limits their practical applicability.

The second chapter develops and validates an algorithm for hydraulic balancing of the network using the example of a central heating substation. Equivalent hydraulic resistances of consumers are determined, critical sections of the network are identified, and the most vulnerable facilities in terms of required pressure provision are revealed.

The third chapter is devoted to the development of a priority-based thermal energy distribution algorithm. A mathematical framework is proposed that accounts for consumer classes, deficit coefficients, load moderator, and normalization procedure ensuring preservation of the overall heat balance. It is demonstrated that the algorithm protects small and socially significant facilities from being displaced by large consumers under limited resource conditions.

The fourth chapter analyzes the operating modes of combined control valves under low thermal loads. Modeling proves that under such conditions combined valves operate outside the stable regulation zone due to insufficient coolant flow. An alternative in the form of a modular control unit with a diaphragm differential pressure regulator and electric actuator is proposed, providing pressure-independent flow control for low-load consumers.

The scientific novelty of the obtained results is as follows:

1. For the first time, a mathematical approach to priority-based heat distribution in district heating networks has been proposed, combining hydraulic and thermal balances while accounting for deficit coefficients, network topology, and consumer priorities.
2. For the first time, a generalized model of combined control valve operation under low thermal loads has been developed, considering nonlinearity of the flow characteristic, dependence of capacity on differential pressure, and stability limits.
3. The methodology of hydraulic modeling of heating networks has been improved by incorporating real topology and operating conditions, enabling correct assessment of low-flow consumers and identification of sections with insufficient pressure.
4. A new analytical model of transition from an elevator unit to an individual heat substation has been developed, describing flow mixing, pressure drop formation, and control valve operation over a wide range of regimes.
5. Critical conditions under which combined regulators fail to provide stable flow for low-load consumers have been established for the first time, allowing

determination of their application limits and formulation of recommendations for control valve selection.

6. An algorithm for selecting control valve size and settings when replacing an elevator unit has been developed, taking into account actual operating pressure drops and heat loads.

The practical significance of the work lies in the possibility of direct application of the developed models, algorithms, and recommendations in modernization and design of heat supply systems. In particular, the developed hydraulic network model can be used by heat supply companies to analyze operating modes and identify nodes with insufficient pressure and priority consumers under capacity deficit conditions. The proposed priority heat distribution algorithm can be integrated into SCADA systems for automatic correction of heat loads based on real network parameters.

The methodology for selecting combined regulators makes it possible to avoid errors in equipment selection, especially for low-load consumers where standard valves may operate outside the stable control zone. The developed models of individual heat substations are applicable in modernization of elevator units, and recommendations on optimal parameters of flow rate, pressure drop, and valve sizing contribute to improving energy efficiency and reliability of network operation.

The obtained results can also be used in the educational process for training specialists in thermal power engineering.

Keywords: district heating system, hydraulic modeling, thermal modeling, prioritized thermal energy distribution, energy resource deficit, hydraulic balancing, pressure differential, heat carrier flow rate, combined control valves, differential pressure regulator, individual heat substation, elevator unit, energy efficiency.

LIST OF THE APPLICANT'S PUBLICATIONS ON THE DISSERTATION TOPIC

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

1. H. Balasanyan and V. Liashenko, Modern Methods for Regulating Urban District Heating Systems under Energy Resource Deficit Conditions, Refrigeration Engineering and Technology (RET), vol. 61, no. 3, pp. 284–290, Sept. 2025.
<https://doi.org/10.15673/ret.v61i3.3213>
(Register of Scientific Professional Publications of Ukraine, Category “B”)
2. H. A. Balasanyan and V. I. Liashenko, Priority Regulation of District Heating Systems Considering Hydraulic Balancing, Proceedings of Odesa Polytechnic National University, 2(72) (Oct 2025), 36-46.
<https://doi.org/10.15276/opu.2.72.2025.04>
(Register of Scientific Professional Publications of Ukraine, Category “B”)
3. H. Balasanyan and V. Liashenko, Modeling Operating Modes of Coolant Flow Control Valves under Local Thermal Conditions, Refrigeration Engineering and Technology (RET), vol. 61, no. 4, Dec. 2025.
<https://doi.org/10.15673/ret.v61i4.3329>
(Register of Scientific Professional Publications of Ukraine, Category “B”)
4. H. Balasanyan and V. Liashenko, Methodology for the Calculation and Design of Individual Heat Substations during the Reconstruction of Elevator Units, Refrigeration Engineering and Technology (RET), vol. 62, no. 1, Mar. 2026.
<https://doi.org/10.15673/ret.v62i1.3388>
(Register of Scientific Professional Publications of Ukraine, Category “B”)

Published works of approbation nature:

5. H. A. Balasanyan, N. V. Krapyva, A. A. Semenii, L. V. Sachenko, V. I. Liashenko, Optimization of Parameters and Operating Modes of a Thermal Storage Tank in an Electric Heating System under Intermittent Operation. International Scientific Conference “Information Society: Technological, Economic and Technical Aspects of Development” (Issue 80), Poland, Sept.

19–20, 2023, pp. 177–182.

<http://www.konferenciaonline.org.ua/ua/article/id-1275/>

6. Hennadii Balasanyan, Artem Ostapenko, Vladyslav Liashenko, Coordination of Electrical and Thermal Load Schedules of a Combined Energy Supply System. Modern Technologies in Biomedical Engineering, III International Scientific and Technical Conference, May 8–10, 2024, Odesa Polytechnic National University, pp. 271–273.
<https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/book/830>
7. Hennadii Balasanyan, Artem Ostapenko, Vladyslav Liashenko, Combined Energy Supply Systems Based on a Gas Turbine Cogeneration Unit and a Wind Generator. Proceedings of the VI International Scientific and Practical Conference “Old and New Technologies of Learning Development in Modern Conditions”, Feb. 13–16, 2024, Berlin, Germany, pp. 297–301.
<https://isg-konf.com/old-and-new-technologies-of-learning-development-in-modern-conditions/>
8. Hennadii Balasanyan, Vladyslav Liashenko, Modern Methods for Regulating Urban District Heating Systems under Energy Resource Deficit Conditions. Proceedings of the XVII International Scientific and Practical Conference “Development of Science through the Latest Technologies and Theories”, Dec. 23–26, 2025, Milan, Italy, pp. 102–106.
<https://isg-konf.com/development-of-science-through-the-latest-technologies-and-theories/>
9. Hennadii Balasanyan, Vladyslav Liashenko, Methodology of Hydraulic Calculation of a District Heating Network. Proceedings of the II International Scientific and Practical Conference “Development of New Technologies and Their Impact on Infrastructure”, Jan. 13–16, 2026, Krakow, Poland, pp. 47–50.
<https://isg-konf.com/development-of-new-technologies-and-their-impact-on-infrastructure/>

10. Hennadii Balasanyan, Vladyslav Liashenko, Modeling of the AFPQMP Control Unit Operation within a Central Heating Substation. Proceedings of the IV International Scientific and Practical Conference “Implementation of Modern Technologies and Their Impact on Industry”, Jan. 27–30, 2026, Paris, France, pp. 42–48.
- <https://isg-konf.com/implementation-of-modern-technologies-and-their-impact-on-industry/>

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень	18
Вступ.....	19
1 Аналіз перспективних напрямків удосконалення систем теплопостачання в умовах дефіциту енергоресурсів	28
1.1 Загальна характеристика систем центрального теплопостачання	29
1.2 Нормативно-правова та регуляторна база функціонування систем теплопостачання.....	34
1.2.1 Основні нормативні документи України.....	34
1.2.2 Європейські підходи	35
1.2.3 Вимоги до надійності, якості та безпеки теплових мереж.	36
1.2.4 Нормативні обмеження, що впливають на режими роботи систем теплопостачання.....	37
1.3 Аналіз використання технологій підвищення ефективності систем централізованого теплопостачання.....	38
1.4 Гідравлічні основи роботи теплових мереж.....	44
1.4.1 Основні гідравлічні поняття	44
1.4.2 Гідравлічні втрати напору.....	44
1.4.3 Вплив гідравліки на працездатність споживачів.....	45
1.5 Теплові режими систем теплопостачання	46
1.5.1 Температурний графік теплових мереж	46
1.5.2 Графік теплового навантаження і “режимний день”.	50
1.6 Існуючі підходи до балансування та регулювання в міських теплових мережах	51
1.6.1 Гідравлічне балансування	51
1.6.2 Теплове балансування	52
1.6.3 Централізоване регулювання.....	53
1.6.4 Локальне регулювання	54
1.7 Класи регуляторів перепаду тиску та витрати теплоносія.....	58
1.7.1 Регулятори перепаду тиску.....	59
1.7.2 Регулятори витрати теплоносія	59

1.7.3	Регулятори комбінованого типу	61
1.8	Традиційні теплові вузли та їх експлуатаційні обмеження	63
	Висновки до розділу	65
	2 Гідравлічно-теплове моделювання мережі теплопостачання	67
2.1	Моделювання гідравлічного розрахунку теплової мережі	67
2.2	Моделювання теплового розподілу	72
2.2.1	Інтегральний показник пріоритетності	74
2.2.2	Модератор теплового навантаження	74
2.2.3	Нормалізація пріоритетів	75
2.2.4	Базовий коефіцієнт теплопостачання	76
2.2.5	Масштабування теплового балансу	76
2.2.6	Фактична тепла подача	77
	Висновки до розділу	81
	3 Дослідження комбінованого клапана в тепловій мережі	83
3.1	Конструкція та принцип дії комбінованого клапана	83
3.2	Діапазони перепаду тиску та умови стабільної роботи клапана	85
3.3	Моделювання витрати теплоносія через клапан при змінному перепаді тиску	87
3.4	Аналіз роботи комбінованого клапана в умовах низьких витрат	90
3.5	Порівняння клапанів модульного та комбінованого типу	91
	Висновки до розділу	93
	4 Моделювання модернізованих локальних теплових вузлів	95
4.1	Моделювання елеваторного вузла	95
4.2	Вихідні дані споживача та формування принципової схеми ІТП ...	104
4.3	Моделювання ІТП та підбір основного обладнання	110
4.4	Аналіз режимів роботи ІТП при змінних умовах теплової мережі ..	116
4.4.1	Аналіз працездатності ІТП при змінному перепаді тиску	119
4.4.2	Аналіз роботи ІТП при змінному тепловому навантаженні	121

4.4.3	Аналіз роботи ІТП при введенні сценаріїв дефіциту теплоти	123
4.4.4	Межі працездатності та узагальнення	127
4.5	Інтеграція ІТП в систему пріоритетного регулювання теплопостачання.....	128
4.6	Практична реалізація методики пріоритетного регулювання в тепловій мережі	129
4.7	Технічні умови та рекомендації щодо впровадження ІТП в системі пріоритетного регулювання	131
4.8	Обмеження застосування та умови ефективної реалізації моделі ...	132
	Висновки до розділу	134
	ВИСНОВКИ.....	136
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	139
	ДОДАТОК А.....	155
	ДОДАТОК Б	158
	ДОДАТОК В.....	159
	ДОДАТОК Г	160
	ДОДАТОК Д.....	161
	ДОДАТОК Е	162
	ДОДАТОК Є.....	163
	ДОДАТОК Ж.....	167
	ДОДАТОК З.....	169

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

СЦТ – система централізованого теплопостачання

ЦТП – центральний тепловий пункт

ІТП – індивідуальний тепловий пункт

ТЕЦ – теплоелектроцентрально

ТМ – теплова мережа

ТКЕ – теплокомуненерго

СО – система опалення

ККД – коефіцієнт корисної дії

АСУ – автоматизована система управління

SCADA – система диспетчерського контролю та збору даних

AFQMP – комбінований регулюючий клапан витрати та перепаду тиску

VFG – регулювальний клапан

AFP – регулятор перепаду тиску

AMEi – електропривод регулювального клапана

DN – умовний діаметр трубопроводу або арматури

ТРВ – термостатичні радіаторні вентиля

ВСТУП

Актуальність теми. Функціонування сучасних СЦТ відбувається в умовах комплексних технічних, енергетичних та економічних обмежень. У більшості країн Європи та, зокрема, в Україні значна частина теплових мереж експлуатується понад нормативний строк служби, що супроводжується зростанням теплових втрат, гідравлічною нерівномірністю та зниженням надійності теплозабезпечення [1-3]. Додатковим фактором є зростання вартості енергоресурсів та необхідність зменшення споживання природного газу, що актуалізує питання підвищення енергоефективності тепlopостачання на всіх рівнях системи [4, 5].

Світові тенденції розвитку галузі пов'язані з переходом до концепції 4-го покоління систем централізованого тепlopостачання та Smart Energy Systems, які передбачають підвищення гнучкості, керованості та інтеграції цифрових технологій управління тепловими потоками [6-8]. У цьому контексті особливого значення набувають методи математичного моделювання гідравлічних і теплових режимів, що дозволяють забезпечити стабільність роботи мережі та оптимізацію розподілу теплової енергії [9-11].

Водночас аналіз реального стану міських теплових мереж свідчить, що значна кількість споживачів досі оснащена застарілими елеваторними вузлами без автоматичного регулювання витрати та перепаду тиску. Така схема підключення не забезпечує стабільного гідравлічного режиму, ускладнює балансування мережі та призводить до нерівномірного розподілу теплоносія між споживачами [12, 13]. Особливо вразливими є низьковитратні споживачі, для яких регулюючі клапани часто працюють поза зоною стабілізованої характеристики, що супроводжується зменшенням регульовальної здатності, підвищеним ризиком кавітаційних явищ та відхиленнями від розрахункових теплових параметрів.

Окрему проблему становлять режими обмеженої теплової потужності або дефіциту енергоресурсів [14]. У таких умовах традиційні підходи до

регулювання, що базуються переважно на локальному налаштуванні окремих елементів системи, не забезпечують керованого й справедливого розподілу теплової енергії між споживачами. Дослідження у сфері керування попитом (demand response) та обмеження навантажень демонструють ефективність алгоритмічних методів управління енергетичними системами, однак у більшості випадків вони не враховують специфіку гідравлічної взаємодії елементів теплових мереж [15, 16].

Таким чином, у сучасних системах централізованого теплопостачання сформувалося системне протиріччя між технічними можливостями зношеної інфраструктури та зростаючими вимогами до надійності, керованості й енергоефективності теплозабезпечення. Існуючі дослідження, як правило, розглядають окремо питання гідравлічного балансування або оптимізації теплових навантажень, тоді як комплексний підхід, що поєднує гідравлічне та теплове моделювання з алгоритмічним пріоритетним розподілом теплової енергії в умовах дефіциту, залишається недостатньо розробленим [17, 18].

У національному контексті актуальність теми підтверджується положеннями Енергетичної стратегії України до 2035 року, Закону України «Про теплопостачання», а також державними програмами модернізації теплового господарства та впровадження енергоощадних технологій у комунальній теплоенергетиці. Рекомендації Міністерства розвитку громад та територій України та проекти міжнародних фінансових організацій, зокрема Світового банку, акцентують необхідність переходу від елеваторних вузлів до індивідуальних теплових пунктів із автоматичним регулюванням та цифровим моніторингом параметрів теплопостачання [19-21].

Виявлені технічні та організаційні обмеження обумовлюють необхідність розроблення комплексної методики, що поєднує гідравлічне та теплове моделювання, алгоритмічне регулювання і обґрунтований вибір регулюючих пристроїв з урахуванням реальних умов експлуатації міських теплових мереж. Такий підхід має забезпечити стабільність перепадів тиску на споживачах, можливість пріоритетного розподілу теплової енергії у періоди дефіциту та

створити основу для впровадження цифрових систем керування теплопостачанням на рівні міської мережі.

Зв'язок роботи з науковими програмами.

Основні наукові та практичні результати дисертаційної роботи одержані при виконанні НДР, яка виконувалась відповідно до статті № 7 Закону України „Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки” в межах пріоритетного напрямку 6. „Новітні технології та ресурсозберігаючі технології в енергетиці, промисловості та агропромисловому комплексі”, а також в рамках держбюджетної НДР № 179-41 № ДР 0119U003518 «Забезпечення ефективного функціонування систем теплопостачання будівель громадського призначення. Теоретико-методологічні та практичні аспекти» і ряду господарсько-договірних робіт.

Тема відповідає пріоритетним завданням МОН України щодо модернізації теплового господарства та впровадження енергоощадних технологій у комунальній теплоенергетиці. Закон України “Про теплопостачання” визначає правові засади функціонування теплових мереж.

Дослідження узгоджується з державними програмами підвищення енергетичної стійкості регіонів, зменшення споживання природного газу, а також з технічними рекомендаціями Міністерства розвитку громад та територій щодо модернізації теплових мереж, автоматизації теплових пунктів і переходу від елеваторних вузлів до індивідуальних теплових пунктів із регульованими клапанами. Проєкти Світового банку демонструють необхідність модернізації централізованих систем теплопостачання на основі автоматичних регуляторів.

Мета дослідження.

Метою роботи є розроблення та обґрунтування алгоритму гідравлічного й теплового моделювання міських систем теплопостачання, що забезпечують коректний вибір регулюючих клапанів, стабільне регулювання витрати та перепаду тиску на споживачах різної потужності, а також реалізацію пріоритетного розподілу теплової енергії в умовах дефіциту теплової потужності.

Задачі дослідження.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі задачі:

- Провести аналітичний огляд сучасного стану міських систем теплопостачання та визначити основні проблеми гідравлічної і теплової нерівномірності споживачів;
- Дослідити нормативні вимоги та технічні обмеження систем регулювання витрати і перепаду тиску, включаючи регулятори серій AFP, AFQMP та інші клапани прямої дії;
- Змоделювати гідравлічний розрахунок теплових мереж із визначенням опорів, перепадів тиску на реальному прикладі теплової мережі;
- Опрацювати теплову модель споживачів та алгоритм пріоритетного розподілу теплової енергії, який враховує дефіцит, топологічні особливості та різницю теплових навантажень;
- Виконати моделювання роботи комбінованого регулятора для споживачів із малими тепловими навантаженнями та визначити діапазони, в яких стабільне регулювання неможливе;
- Провести аналіз і порівняння різних варіантів модернізації вузлів підключення з переходом від елеваторних систем до індивідуальних теплових пунктів;
- Розробити модель ІТП із регулюючими клапанами прямої дії та виконати оцінку його роботи при різних режимах тиску та витрати;
- Оцінити вплив заміни елеваторного вузла на гідравліку ділянки теплової мережі та сформулювати рекомендації щодо вибору типорозмірів клапанів і параметрів їх налаштування;
- Узагальнити результати моделювання та сформулювати практичні рекомендації для підвищення ефективності теплопостачання споживачів;

Об'єкт дослідження.

Об'єктом дослідження є процеси гідравлічного та теплового функціонування міських систем централізованого теплопостачання.

Предмет дослідження.

Предметом дослідження є методи та алгоритми регулювання витрати й перепаду тиску, вибір і робота регулюючих клапанів, а також математичні моделі теплового розподілу й гідравлічної взаємодії споживачів у мережі теплопостачання.

Наукова новизна отриманих результатів

1. Вперше запропоновано пріоритетний розподіл теплової енергії в мережах централізованого теплопостачання, який поєднує гідравлічний баланс, тепловий баланс та коефіцієнти дефіцитності, топології й навантаження.
2. Вперше узагальнено модель роботи комбінованих регулюючих клапанів у режимах малих теплових навантажень, що враховує залежність пропускну здатності від перепаду тиску, нелінійність витратної характеристики та межі стабільності регулювання.
3. Удосконалено методику гідравлічного моделювання теплових мереж, що дозволяє коректно оцінювати роботу споживачів із низькими витратами теплоносія та виявляти ділянки, у яких регулятори працюють поза своїм ефективним діапазоном.
4. Отримано нову методику переходу від елеваторного вузла до індивідуального теплового пункту, яка описує змішування потоків, формування перепадів тиску та роботу регулюючого клапана в широкому діапазоні режимів.
5. Вперше встановлено критичні умови, за яких комбіновані регулятори не забезпечують стабільної витрати на малих споживачах, що дозволяє визначати межі застосування та сформулювати рекомендації щодо їхнього підбору.
6. Розроблено алгоритм вибору типорозміру і налаштувань регулюючого клапана для заміни елеваторного вузла, який враховує реальні робочі перепади тиску та теплові навантаження.

Практична значимість одержаних результатів.

Практичне значення роботи полягає у можливості безпосереднього використання отриманих моделей, алгоритмів та рекомендацій у проектуванні й експлуатації систем централізованого тепlopостачання. Основні результати, що мають прикладний характер:

- Розроблена гідравлічна модель теплової мережі може застосовуватися тепlopостачальними підприємствами для аналізу режимів роботи, оцінювання вузлів із недостатнім тиском та визначення споживачів, які мають пріоритет у періоди дефіциту теплової потужності;
- Алгоритм пріоритетного розподілу теплової енергії може бути інтегрований у SCADA-системи, з можливістю автоматичного перерахунку теплових навантажень на основі реальних параметрів мережі;
- Запропонована методика підбору комбінованих регулюючих клапанів дозволяє уникнути помилок у виборі обладнання, зокрема у випадках малих споживачів, де стандартні регулятори працюють поза діапазоном стабільності;
- Отримані моделі роботи індивідуального теплового пункту для заміни елеваторних вузлів можуть використовуватися при розробленні технічних рішень щодо модернізації теплових пунктів;
- Сформовані рекомендації щодо оптимальних параметрів витрати, перепаду тиску та типорозміру клапанів забезпечують можливість підвищення енергоефективності та стабільності роботи теплових мереж;
- Результати роботи використовуються у навчальному процесі кафедри «Теплових електростанцій та енергозберігаючих технологій» Національного університету «Одеська політехніка» у освітніх компонентах «Математичне моделювання технічних систем» та «Математичне моделювання та дослідження в теплоенергетиці».

Методи дослідження. Для розв'язання поставлених задач дослідження було використано: методи гідравлічного розрахунку трубопроводів та вузлів мережі на основі законів гідродинаміки та рівняння Бернуллі; методи теплового розрахунку споживачів та формування теплових балансів; математичні

моделі регулювання витрати й перепаду тиску, включаючи моделі клапанів прямої дії; методи чисельного моделювання для аналізу роботи регулюючих клапанів у змінних режимах; алгоритми оптимізаційного розподілу теплової енергії при дефіциті теплової потужності; аналітичні та статистичні методи обробки результатів і порівняння розрахункових режимів; програмні засоби для реалізації теплових і гідравлічних моделей (Excel, інженерні таблиці, виробнича документація).

Особистий внесок здобувача.

Усі основні результати, викладені в дисертації, отримані здобувачем особисто. Основні наукові результати, що представлені в дисертаційній роботі, одержані автором в період з 2021 по 2025 рр. Теоретичні та експериментальні дослідження виконано особисто, а впровадження результатів досліджень виконувалося при безпосередній участі автора. Дисертаційна робота є самостійним дослідженням, яке надане у вигляді рукопису, а конкретна участь автора підтверджується списком його особистих публікацій, участю в міжнародних і вітчизняних конференціях.

Особистим внеском автора в роботу є:

1. Вибір наукового напрямку, вивчення проблематики, критичний аналіз сучасних методів аналізу регулювання теплових мереж, постановка мети і задач дисертаційної роботи;
2. Збір, систематизацію та аналіз вихідних даних теплової мережі;
3. Побудова гідравлічної моделі мережі, розрахунок опорів, та режимів роботи споживачів;
4. Розроблення математичної моделі теплового розподілу та алгоритму пріоритетного регулювання;
5. Виконання розрахунків і порівняльного аналізу варіантів заміни елеваторних вузлів індивідуальними тепловими пунктами;
6. Формулювання наукових положень, висновків і практичних рекомендацій;

Особистий творчий внесок автора підтверджується опублікованими за те мою дисертації науковими роботами, в тому числі 4 статтями у фахових виданнях.

Апробація результатів дисертації.

Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на:

- Міжнародна наукова конференція «Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення (випуск 80)», Польща, 19-20 вересня 2023;
- Сучасні технології біомедичної інженерії. III МНТК, 08-10 травня 2024 р., Нац. ун-т «Одеська політехніка»;
- Матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції «Old and new technologies of learning development in modern conditions», 13-16 лютого 2024 р., Берлін, Німеччина;
- Матеріали XVII Міжнародної науково-практичної конференції «Development of science through the latest technologies and theories» 23-26 грудня 2025 р., Мілан, Італія;
- Матеріали II Міжнародної науково-практичної конференції «Development of new technologies and their impact on infrastructure», 13-16 січня 2026 р., Краків, Польща;
- Матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції «Implementation of modern technologies and their impact on industry», 27-30 січня 2026 р., Париж, Франція.

Публікації.

За темою дисертації опубліковано 10 наукових робіт, з них 4 статті у фахових виданнях України, 6 повних текстів доповідей на міжнародних конференціях.

Структура і об'єм роботи.

Дисертаційна робота складається зі вступу, основного змісту, що включає в себе п'ять розділів, загальних висновків, списку використаної літератури.

Робота викладена на 169 стор., з них 145 стор. основного тексту, список використаних джерел з 130 найменувань на 14 стор., 28 рисунків та 8 таблиць, 9 додатків.

1 АНАЛІЗ ПЕРСПЕКТИВНИХ НАПРЯМКІВ УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ В УМОВАХ ДЕФІЦИТУ ЕНЕРГОРЕСУРСІВ

Питання надійності та стабільності міських систем теплопостачання набуло особливої актуальності в умовах сучасних геополітичних викликів і обмежених енергоресурсів. Значний знос теплових мереж, високий відсоток застарілих елеваторних вузлів та зростання вимог до енергоефективності зумовлюють необхідність нових підходів до керування розподілом теплової енергії. В умовах дефіциту паливно-енергетичних ресурсів особливо важливо забезпечити керований і справедливий розподіл теплової енергії між споживачами з різними навантаженнями та гідравлічними характеристиками. Однак аналіз сучасних українських публікацій показує, що сьогоденні централізовані системи опалення працюють за статичними принципами регулювання – відсутність механізмів пріоритетного розподілу призводить до того, що критично важливі об'єкти можуть недоотримувати тепло. Практика експлуатації підтверджує, що стандартні підходи балансування мереж не гарантують стабільної роботи малих споживачів: регулюючі клапани часто виходять за межі допустимих діапазонів, погіршуючи якість теплозабезпечення. Це свідчить про наявність науково-технічного розриву – комплексного алгоритму пріоритетного керування теплопостачанням досі не розроблено і не представлено у відкритих джерелах.

Огляд літератури підтверджує, що більшість досліджень зосереджено на традиційних методах регулювання (погодо-залежне керування, балансування витрати та тиску тощо), тоді як проблема пріоритетного розподілу тепла за важливістю споживачів залишалася поза увагою дослідників. Зокрема, відсутність пріоритетної логіки регулювання визначена як один із ключових недоліків існуючих систем: мережі не розподіляють теплові ресурси за критичністю споживачів. Наведено постановку задачі та принципову блок-схему такого алгоритму, який покликаний забезпечити збереження теплового комфорту для

критичних споживачів у кризових умовах енергетичного дефіциту. Ці напрацювання по суті – стали першими вітчизняними рішеннями, що визначають проблему пріоритетного регулювання теплопостачання. Іншими словами, досі подібні підходи не були предметом повноцінного дослідження: у доступній літературі відсутні комплексні алгоритми, які поєднували б пріоритетний розподіл тепла з гідравлічним балансуванням мереж в умовах дефіциту енергоресурсів. Це підкреслює наукову новизну обраної тематики і важливість проведення дослідження.

Отже, наукова новизна даної роботи полягає у розробленні принципово нового підходу до керування міськими тепломережами за умов браку енергоресурсів – а саме алгоритму пріоритетного регулювання теплопостачання з урахуванням гідравлічного балансування мережі. Запропонований алгоритм спрямований на забезпечення керованого розподілу теплової енергії, чого не можуть гарантувати існуючі засоби регулювання. Оригінальність підходу підтверджується тим, що він вперше поєднує алгоритми пріоритетного розподілу тепла з удосконаленими методами гідравлічно-теплового моделювання мереж, дозволяючи врахувати обмеження пропускної здатності та стабільність роботи регулюючих клапанів. Таким чином, тема дисертації є новою і відповідає актуальним потребам галузі, оскільки жодних аналогічних алгоритмів у відкритих джерелах досі не опубліковано. Це створює підґрунтя для формулювання наукової задачі дослідження, спрямованої на ліквідацію виявленого розриву між вимогами практики та наявними технічними рішеннями.

1.1 Загальна характеристика систем центрального теплопостачання

Системи централізованого теплопостачання є [22] ключовою інженерною інфраструктурою міста, що забезпечує будівлі тепловою енергією для опалення та гарячого водопостачання. Типова система теплопостачання включає джерело теплової енергії (котельню або теплоелектроцентрально), розгалужену мережу магістральних і розподільчих трубопроводів, центральні або

індивідуальні теплові пункти, а також внутрішньо-будинкові системи споживачів. Комплексний опис технологій і компонентів таких систем наведено у науковій роботі [23]. Функціонування СЦТ ґрунтується на керованому русі теплоносія, який доставляє необхідну кількість теплової енергії кожному споживачу з урахуванням його теплового навантаження та гідравлічних характеристик мережі.

Більшість міських систем централізованого теплопостачання України були створені у 1960–1990-х роках, коли пріоритетом проектування була максимальна надійність і пропускна здатність мереж, а питання енергоефективності відходили на другий план [24-26]. Унаслідок цього сучасні теплові мережі успадкували низку системних проблем. Зокрема, значна частина мереж має підвищені теплові втрати через застарілу ізоляцію трубопроводів, недостатній рівень автоматизації та дистанційного керування, гідравлічну розбалансованість споживачів за витратою теплоносія і перепадом тиску, а також велику частку морально застарілих елеваторних теплових вузлів. Більшість таких систем побудовані за принципом постійної витрати теплоносія з мінімальними можливостями регулювання параметрів, що негативно впливає на їх енергоефективність та керованість в умовах змінних теплових навантажень.

Одним із ключових компонентів СЦТ є власне теплові мережі – система трубопроводів, яка забезпечує транспорт теплоносія від джерела до споживачів. На практиці міські теплові мережі характеризуються складною розгалуженою топологією: наявністю паралельних гілок, ділянок з різними діаметрами та пропускною здатністю, а також значними перепадами геодезичних відміток між різними частинами міста [27, 28]. Така складність структури призводить до появи гідравлічної нерівномірності: одні будівлі отримують надлишковий перепад тиску, тоді як у віддалених споживачів тиску може не вистачати. Подібні диспропорції часто не дозволяють дотримуватися проєктних теплових графіків подачі теплоносія для всіх споживачів одночасно. Попередні дослідження підтверджують критичну роль стабільності перепаду тиску в тепловій мережі для забезпечення надійного теплопостачання.

Сучасні принципи автоматизованого керування розподільчими тепловими мережами детально висвітлено у працях [29].

В умовах українських міст центральні теплові пункти досі залишаються вузловими точками з великим навантаженням та широким спектром підключених споживачів, проте їх можливості щодо оперативного перерозподілу теплової енергії обмежені.

Важливою складовою СЦТ є також внутрішньо-будинкові системи опалення та гарячого водопостачання споживачів. У багатьох будівлях старого житлового фонду досі експлуатуються однотрубні системи опалення, робота яких критично залежить від стабільності мережевого перепаду тиску. Якщо тиск у тепломережі знижується нижче розрахункових значень, у віддалених стояках верхніх поверхів не забезпечується необхідна температура повітря. Натомість надлишковий перепад тиску призводить до перегріву на нижніх поверхах, шуму в радіаторах та розбалансування внутрішньої системи розподілу тепла [30]. Таким чином, якість теплозабезпечення окремого будинку безпосередньо залежить від гідравлічної рівноваги як у зовнішній мережі, так і в його внутрішній системі.

У сучасних умовах експлуатації централізовані системи теплопостачання повинні функціонувати в межах опалювального періоду за доволі мінливих теплових навантажень і зовнішніх умов. Це обумовлено, з одного боку, тенденцією до зменшення споживання теплової енергії (через енергоощадні заходи та утеплення будівель), а з іншого – ущільненням міської забудови та значними коливаннями температури зовнішнього повітря протягом опалювального сезону. Необхідність економії дефіцитних паливно-енергетичних ресурсів також вимагає гнучкого реагування системи на зміни теплового навантаження [31-33]. Європейська концепція теплопостачання четвертого покоління визначає автоматизацію і балансування як обов'язкові елементи сучасних теплових мереж. У сучасних дослідженнях розвиток систем теплопостачання розглядається у взаємозв'язку з концепцією smart energy systems та підвищенням рівня керованості енергетичних потоків [34-36]. Отже, сучасна тепла мережа

має бути достатньо гнучкою і керованою, щоб підтримувати нормативні параметри теплоносія навіть за умов пікових навантажень або тимчасового дефіциту теплової потужності, які неминуче виникають протягом опалювального періоду.

Загальна ефективність та керованість систем централізованого теплопостачання значною мірою визначається рівнем впровадження сучасних засобів автоматизації і регулювання. Одним із ключових напрямів підвищення ефективності СЦТ є впровадження автоматизованих регулюючих пристроїв, зокрема регуляторів перепаду тиску та витрати теплоносія [37, 38]. Аналіз роботи регулюючих клапанів у теплових станціях представлено в дослідженні, а практичні результати модернізації тепломереж (проекти під егідою ПРООН) підтверджують ефективність використання автоматизованих регулюючих вузлів. Такі рішення дозволяють забезпечити стабільний гідравлічний режим на рівні кожного споживача та зменшити неконтрольовані перетоки теплоносія між ділянками мережі [39, 40]. Водночас ефективність їх застосування залежить від відповідності робочих діапазонів регуляторів реальним перепадам тиску в мережі та фактичним витратам споживачів. Для абонентів із малими тепловими навантаженнями типовою є ситуація, коли навіть сучасні регулятори виходять за межі стабільного робочого режиму, що спричиняє значні коливання витрати і погіршення якості регулювання. В таблиці 1.1 узагальнено основні технічні проблеми міських теплових мереж, їхні типові причини, прояви та наслідки для споживачів.

Таблиця 1.1 (початок)

Основні технічні проблеми міських теплових мереж

№	Технічна проблема	Причина виникнення	Прояв у мережі	Наслідки для споживачів
1.	Нерівномірний розподіл перепаду тиску	Велика протяжність мереж, неоднакові опори ділянок, відсутність балансування	Перепад тиску у віддалених вузлах падає до 2-5 кПа	Нестабільна витрата, недогрів будівель

Таблиця 1.1 (закінчення)

№	Технічна проблема	Причина виникнення	Прояв у мережі	Наслідки для споживачів
2.	Гідравлічне «витіснення» малих споживачів	Великі споживачі мають менший питомий опір, сильніше «тягнуть» потік	Малі будинки не отримують проєктну витрату	Порушення температурного графіка
3.	Відсутність автоматичного регулювання в елеваторних вузлах	Фіксоване сопло, відсутність зворотного зв'язку	Немає можливості підтримувати витрату	Перегрів одних споживачів і недогрів інших
4.	Старіння трубопроводів та зростання локальних опорів	Корозія, відкладення, зношеність	Збільшення фактичних втрат тиску	Дефіцит потужності на кінцевих ділянках
5.	Нестабільність джерела тепла при дефіциті газу	Робота котелень у режимах 70–90 %	Коливання температури подачі	Порушення комфорту у житлових будинках
6.	Відсутність пріоритетної логіки регулювання	Мережа працює за статичними принципами	Немає розподілу ресурсів за важливістю	Критичні об'єкти отримують менше тепла, ніж потрібно

Таким чином, на початковому етапі аналізу можна окреслити коло ключових проблем ефективності та керованості СЦТ, що обґрунтовує необхідність подальших досліджень у напрямку їх вирішення.

1.2 Нормативно-правова та регуляторна база функціонування систем теплопостачання

1.2.1 Основні нормативні документи України.

В Україні створено розгалужену нормативно-правову базу, що регулює діяльність у сфері теплопостачання. Центральним актом є Закон [41] України, який визначає основні правові, економічні та організаційні засади діяльності у сфері теплопостачання. Цей закон регулює відносини, пов'язані з виробництвом, транспортуванням, постачанням і використанням теплової енергії з метою підвищення надійності та ефективності функціонування систем теплопостачання. Окрім цього, Закон України встановлює правові рамки надання комунальних [42] послуг, зокрема послуги з постачання теплової енергії,

визначаючи права і обов'язки споживачів та постачальників. Закон вимагає, щоб якість комунальної послуги (в т. ч. теплопостачання) відповідала вимогам, встановленим законодавством та договором між споживачем і виконавцем. Важливе значення має також Закон України, який зобов'язує обладнання будівель приладами обліку тепла, стимулюючи раціональне використання енергії. На період воєнного стану нормативне поле доповнено спеціальним Законом України, що визначає особливості регулювання відносин у сфері теплопостачання в умовах надзвичайних ситуацій [43-45] (зокрема, мораторій на підвищення тарифів тощо).

Вторинне законодавство деталізує вимоги до функціонування теплових мереж. Правила надання послуги з постачання теплової енергії затверджені постановою запроваджують сучасний підхід до договірних відносин між теплопостачальною організацією та споживачами, визначаючи порядок укладання типових договорів, параметри якості послуги та порядок перерахунку оплати у разі відхилення від нормативних умов. Окрім того, урядом затверджено порядки, що стосуються комерційного обліку та контролю якості: зокрема, процедури встановлення і перевірки [46, 47] лічильників, а також алгоритми перерахунку плати за недотримання нормативних параметрів послуги. Державне регулювання галузі здійснюється національним регулятором (НКРЕКП) відповідно до Закону України та профільного законодавства про енергетику; ліцензійні умови провадження діяльності з теплопостачання встановлюють додаткові організаційні вимоги до підприємств галузі [48].

1.2.2 Європейські підходи

Розвиток нормативної бази теплопостачання в Україні враховує європейський досвід [49-52]. В країнах ЄС централізоване теплопостачання регулюється директивами і національними законами, що акцентують енергоефективність та екологічність. Зокрема, Директива зобов'язала держави-члени провести комплексну оцінку потенціалу високоефективної когенерації та

ефективного централізованого теплопостачання. Європейські нормативи стимулюють модернізацію теплових мереж, інтеграцію когенерації та відновлюваних джерел, а також запровадження високих стандартів якості послуг [53-56]. У багатьох країнах ЄС впроваджені технічні стандарти, які забезпечують надійну і безпечну експлуатацію трубопроводів [57]. Хоча пряме порівняння виходить за межі цього підрозділу, в цілому європейський підхід характеризується жорсткими вимогами до енергоефективності, екологічної безпеки та надання споживачам якісних послуг безперервного теплопостачання.

1.2.3 Вимоги до надійності, якості та безпеки теплових мереж.

Українські нормативні акти містять чіткі критерії щодо надійності, якості й безпечності функціонування систем теплопостачання. Державні будівельні норми визначають, що системи теплопостачання повинні відповідати вимогам надійності функціонування, безпечної експлуатації, екологічності та енергозбереження [58-60]. Надійність теплопостачання забезпечується як на етапі проєктування, так і під час експлуатації: передбачається резервування потужностей та мереж для споживачів першої категорії (важливих об'єктів, як-от лікарні), дублювання критичних елементів системи, а також оперативна ліквідація аварійних ситуацій. Нормативи технічного характеру, встановлюють обов'язкові заходи для забезпечення безперебійної роботи мереж у зимовий період, що підвищує надійність систем [61]. Якість теплопостачання характеризується відповідністю параметрів теплоносія встановленому температурному графіку та санітарним нормам мікроклімату приміщень. Відповідно до законодавства про житлово-комунальні послуги, відхилення фактичної температури у приміщенні або графіка подачі тепла від нормативних значень розглядається як погіршення якості послуги і тягне перерахунок платежів споживачам. Для контролю якості вводиться системи комерційного обліку теплової енергії, а також встановлено порядок моніторингу надання послуг.

Правила технічної експлуатації теплових установок і мереж визначають базові організаційні та технічні вимоги для безпечної, надійної та економічної роботи усіх елементів системи теплопостачання [62]. Цей документ зобов'язує теплопостачальні підприємства дотримуватися регламентів планово-попереджувальних ремонтів, забезпечувати підготовку обладнання до опалювального сезону, вести технічну документацію тощо. Виконання вимог цих нормативів є обов'язковим для всіх суб'єктів у сфері теплопостачання, незалежно від форми власності, що сприяє запобіганню аварій та створенню безпечних умов для персоналу і споживачів.

1.2.4 Нормативні обмеження, що впливають на режими роботи систем теплопостачання.

Законодавчо-нормативна база визначає низку граничних умов, в межах яких мають функціонувати теплові мережі та джерела тепла [63]. Державні будівельні норми задають допустимі параметри теплоносія: зокрема, магістральні мережі гарячого водопостачання проєктуються для роботи з температурою води не більше 200 °С і тиском до 2,5 МПа, а парові мережі – з температурою пари до 440 °С і тиском до 6,3 МПа. Ці обмеження визначають максимально допустимі режими роботи систем без втрати міцності трубопроводів та арматури. Нормативами також встановлено типові температурні графіки подачі теплоносія в залежності від температури зовнішнього повітря [64]; теплопостачальні організації зобов'язані дотримуватися цих графіків, щоб у приміщеннях забезпечувалися нормативні +18...+20 °С. Значний вплив на режими роботи мають соціально-нормативні вимоги: так, в опалювальний сезон забороняються необґрунтовані перерви у теплопостачанні. Діючими правилами передбачено гранично допустиму тривалість відключень тепла при аваріях або ремонтах, як правило, не більше 12–24 годин (залежно від температури надворі), і вимогу заздалегідь повідомляти споживачів про планові зупинки. У разі перевищення допустимих перерв або значних відхилень параметрів

теплоносія від норми, постачальник несе відповідальність (аж до штрафних санкцій та відшкодування споживачам) згідно з Законом та умовами договорів. Таким чином, нормативно-правова база встановлює чіткі межі і критерії, в рамках яких мають працювати системи тепlopостачання, забезпечуючи стабільне, якісне і безпечне теплозабезпечення споживачів.

Сучасні системи централізованого тепlopостачання в Україні опинилися в умовах, коли дефіцит енергоресурсів перестав бути теоретичною загрозою і набув статусу постійного обмежувального фактору. Постанова Кабінету Міністрів встановила норму скорочення гарантованих обсягів природного газу для підприємств теплокомуненерго на 10 % у порівнянні з попередніми сезонами. Данна постанова сигналізує про необхідність переходу від статичного керування тепломережами до адаптивних моделей [65, 66] розподілу, орієнтованих на раціональне використання дефіцитного ресурсу.

1.3 Аналіз використання технологій підвищення ефективності систем централізованого тепlopостачання

У сучасних міських системах централізованого тепlopостачання проблема керованості режимів виходить за межі класичного підтримання температурного графіка чи стабілізації тиску. Розвиток 4th Generation District Heating (4GDH), інтеграція низькопотенційних і відновлюваних джерел, підвищення вимог до енергоефективності та надійності, а також зростання частоти кризових ситуацій (дефіцит палива, обмеження потужності джерел, відключення електроенергії, аварійні обмеження мережі) формують нову постановку задачі: необхідно забезпечити кероване постачання теплової енергії за умов, коли задовольнити весь попит одночасно технічно або ресурсно неможливо.

У таких умовах актуалізується концепція пріоритетного регулювання: система має не просто зменшувати дисбаланс в системі, а керовано визначати,

яким споживачам і в якій мірі гарантувати теплопостачання, зберігаючи при цьому гідравлічну реалізацію та стабільність режимів.

У європейському науковому дискурсі розвиток 4GDH розглядається як системна відповідь на декарбонізацію та секторну інтеграцію, де тепломережа стає інфраструктурою для гнучкого обміну теплом між багатьма джерелами й споживачами.

Автори Lund, H., Østergaard, P. A., Connolly, D., & Mathiesen, B. V. в оглядовій статті [68] журналу «Energy», описують стан та результати досліджень 4GDH. Вони підкреслюють, що перехід до нижчих температур мережі, зростання ролі розподілених джерел і цифровізації підсилюють вимоги до точності регулювання витрат і тисків, а також до здатності системи працювати в умовах змінних навантажень без зниження якості послуги. У практичному сенсі це означає, що гідравлічне балансування і коректне керування перепадами тиску стають базовою умовою надійної експлуатації: низькотемпературні режими мають менші запаси за температурним напором, тому будь-яка розбалансованість витрат швидше проявляється у локальних недогрівах, перевитратах електроенергії на насосному обладнанні та зростанні зворотних температур, що погіршує ефективність джерел і теплових насосів.

Питання гідравлічного балансування історично розвивалося як інженерна практика налаштування мережі (дроселювання, підбір шайб, статичні уставки регуляторів), проте сучасні роботи демонструють еволюцію до модельно-обґрунтованих і адаптивних стратегій. Типова проблема міських мереж — нерівномірний розподіл витрат: ближчі до котельні або ЦТП споживачі отримують надлишковий протік, тоді як віддалені гілки потерпають від дефіциту витрати. У відповідь оператори часто підвищують загальний тиск або температуру подачі, що збільшує втрати та енергоспоживання й не гарантує розв'язання проблеми на прикінцевих ділянках мережі.

Автори He, X., Zhou, J., & Li, N. роботи [66] в «Journal of Building Engineering» демонструють підхід, у якому дисбаланс трактується як об'єкт керування: автори виконують аналіз причин розбалансованості такі як вплив

початкових витрат, теплових навантажень і розташування споживачів у топології мережі та пропонують удосконалену стратегію керування диференціальним тиском із змінними уставками. Сильна сторона такого підходу полягає в переході від “*підтримання (Δp) як самоцілі*” до регулювання, що відображає реальні гідравлічні взаємозв’язки між гілками мережі та споживачами. Водночас, з точки зору пріоритетного регулювання в дефіциті, подібні роботи зазвичай орієнтовані на вирівнювання або мінімізацію дисбалансу як універсальну мету, тоді як у дефіцитному режимі оптимальна стратегія може вимагати контрольованого, цільового нерівномірного забезпечення, яке узгоджується з пріоритетами споживачів.

Окремий напрям у літературі спрямований на формування теоретично гарантованих законів керування гідравлічним режимом. Такі підходи набувають ваги у зв’язку з ускладненням тепломереж (кільцеві та змішані топології, множинні джерела, змінні конфігурації, взаємодія з електроенергетикою) і ризиком нестійких перехідних процесів при активному керуванні насосами та регулювальною арматурою.

У роботі [67] Strehle, F., Machado, J. E., та співавторів запропоновано пасивнісно-орієнтовану рамку керування для тепломереж, яка забезпечує асимптотичну стійкість рівноважних режимів і підтримує концепцію децентралізованих регуляторів. Для задачі дисертації важливим є методологічний висновок: пріоритетне керування, яке в дефіциті буде агресивнішим (більш часті зміни уставок, перерозподіл потоків між районами), повинно спиратися на стійкий нижній рівень гідравлічного регулювання, інакше система може входити в небажані коливальні або погано керовані режими. Водночас такі теоретичні підходи рідко містять явний механізм пріоритезації споживачів або постановку задачі – які групи споживачів будуть забезпечуватись повноцінно, які отримають більше теплопостачання, а які менше, залишаючи це на рівні верхнього керування або налаштування диспетчеризації.

Паралельно розвиваються підходи, що об’єднують гідравліку й теплофізику в динамічних моделях і використовують оптимізацію для вибору

керуючих впливів. У «Energy and Built Environment» розглянуто стратегії [68] збалансованої роботи системи на основі динамічного гідравлічно-теплого моделювання, а керуючі дії зокрема, налаштування арматури оптимізуються методом рою частинок (PSO) з метою поліпшення рівномірності теплопостачання. Це наближає дослідника до формату, потрібного для пріоритетного регулювання: балансування вже не є суто післяналагодочним процесом, а інтегрується в алгоритм керування. Проте ключовий виклик дефіцитних режимів полягає в тому, що оптимізація має враховувати не лише критерій рівномірності або якості, а і ресурсні обмеження (ліміт теплової потужності, паливо, електроенергія насосів) та правила пріоритетів, які визначають допустиму деградацію послуги по різних групах споживачів.

У верхньому рівні керування тепломережами домінує оптимізаційна парадигма, яка за останнє десятиліття стала значно більш практично орієнтованою. Зокрема, стаття [69] Schindler, M., Gnam, L., Puchegger, «Energies» демонструє роботу на основі оптимізації на двох реальних майданчиках, що є важливим аргументом на користь операційної реалізації оптимізаційних методів у реальних системах. Перевагою таких робіт є наявність реалістичних обмежень, прив'язка до даних експлуатації та відображення впливу режимних параметрів на втрати/ефективність. Для задачі дисертації це формує базис: якщо оптимізація може бути інтегрована в експлуатацію, то на її основі можливо сформулювати і механізм пріоритетного розподілу тепла. Разом з тим, у подібних роботах пріоритетність споживачів часто не є центральним елементом постановки; натомість оптимізація може бути спрямована на мінімізацію витрат, викидів, втрат або на оптимальну диспетчеризацію джерел без явного формулювання політики керованого недопостачання.

Важливою ланкою між мережевими обмеженнями та дефіцитом є керування навантаженням на стороні споживача. Сучасні підходи на базі MPC (зокрема економіс MPC) дозволяють використовувати теплову інерцію будівель і систем внутрішнього опалення як буфер для згладжування піків і зменшення потреби у миттєвому виробітку. Стаття [71] в журналі «Energy and Buildings»

досліджує demand-side economic MPC та показує, як мультиоб'єктивна оптимізація може зменшувати енергоспоживання та пікові навантаження, впливаючи на загальний режим СЦТ. У контексті пріоритетного регулювання це принципово: дефіцит може компенсуватися не лише жорстким обмеженням на мережі, а й гнучкістю попиту, де різні категорії споживачів мають різний допустимий рівень зміни уставок. Однак впровадження такого підходу потребує інфраструктури керування в будівлях і регуляторних механізмів доступу до гнучкості, що може бути обмеженням для багатьох пострадянських міських мереж з неоднорідним станом ІТП та автоматики.

Окремо слід відзначити, що розвиток оптимізаційного керування тепломережами неможливий без якісної моделі, а її якість у реальних умовах визначається здатністю коректно відтворювати гідравлічні параметри мережі та зміни навантажень. Тому останні роки посилюється тренд цифрових двійників (DT), які не обмежуються симуляцією, а включають процедури ідентифікації параметрів і прогнозування попиту на основі SCADA-даних. Характерним прикладом є робота [72] Zhou, H., et al. в «Energy», де запропоновано цифрового двійника тепломережі з ідентифікацією гідравлічних опорів і прогнозом теплового навантаження, що дозволяє підвищити точність моделі для задач керування. Для дисертаційної теми це дає важливий методичний елемент: пріоритетне регулювання в дефіциті потребує не лише оптимального алгоритму, а й контуру підтримання актуальності моделі — інакше оптимізація буде чутливою до застарівання даних, неповних вимірювань, зміни характеристик мережі чи непередбачених перемикань арматури.

Таким чином, аналіз літератури дозволяє сформулювати комплексний висновок: дослідження з гідравлічного балансування, оптимізаційного керування та цифровізації тепломереж активно розвиваються, однак часто розглядаються як відносно автономні напрями. Балансування переважно орієнтується на зменшення нерівномірності витрат і покращення якості теплопостачання, теоретичні роботи зі стійкості забезпечують коректність нижнього рівня керування, оптимізаційні підходи демонструють можливість

формалізованого вибору режимів, а цифрові двійники забезпечують зв'язок моделей із даними. Водночас саме постановка, що відповідає концепції — пріоритетне регулювання в умовах дефіциту — у літературі представлена недостатньо системно.

Наукова прогалина проявляється у відсутності або фрагментарності методик, які одночасно:

- формалізують пріоритетність споживачів як частину керування (через ваги, квоти, мінімальні гарантії або багатокритеріальну постановку);
- гарантують гідравлічну здійсненність режимів при керованому обмеженні теплопостачання;
- працюють як штатний алгоритм для дефіцитних режимів з явними ресурсними обмеженнями (паливо/потужність/електроспоживання насосів/аварійні обмеження);
- мають робастність до невизначеності параметрів і вимірювань завдяки інтеграції з SCADA/DT та процедурами ідентифікації і калібрування.

Саме ця прогалина створює підстави для формування дисертаційного внеску: розроблення пріоритетного регулювання як ієрархічного алгоритму, де нижній рівень забезпечує стабільну гідравлічну поведінку балансування та стабілізація, верхній — здійснює оптимізаційний розподіл теплової енергії та дефіциту з урахуванням пріоритетів, а цифровий контур підтримує актуальність моделі та параметрів за даними експлуатації.

Як наслідок, перспективним напрямом подальших досліджень є розроблення формалізованої постановки задачі пріоритетного теплопостачання в дефіциті з інтеграцією:

- гідравлічних обмежень мережі;
- теплової динаміки і запізнь;
- ресурсних обмежень джерел і насосних станцій;
- механізмів керування теплопостачанням;
- процедур оцінювання стану й параметрів мережі.

Такий підхід дозволяє перейти від реактивного аварійного перерозподілу до відтворюваного алгоритму, який забезпечує контрольований рівень тепlopостачання для різних груп споживачів і мінімізує системні втрати в умовах дефіциту енергоресурсів.

1.4 Гідравлічні основи роботи теплових мереж

1.4.1 Основні гідравлічні поняття

Теплова мережа транспортує теплоносій від джерела тепла до споживачів, і ключовими величинами для її гідравлічного розрахунку є витрата – (Q), тиск – (p), гідравлічний напір – (H) та гідравлічний опір – (R). Гідравлічний режим теплової мережі [73] визначається співвідношенням витрат теплоносія, витрат напору та опору елементів системи. З практичної точки зору зручно оперувати гідравлічним напором, який визначається як:

$$H = \frac{p}{\rho g} + z \quad (1.1)$$

де H – повний напір, м;

p – тиск, Па;

ρ – густина теплоносія, кг/м³;

g – прискорення вільного падіння, м/с²;

z – геодезична висота, м.

Напір є ключовою величиною, що визначає потенційну здатність потоку подолати опір у трубопроводі.

1.4.2 Гідравлічні втрати напору

При русі теплоносія трубопроводом частина енергії втрачається на подолання опору. Повна втрата напору (ΔH) включає:

- лінійні втрати від тертя уздовж стінок труби;
- місцеві втрати у фасонних частинах, арматурі тощо.

Сумарно:

$$\Delta H = \Delta H_l + \Delta H_m \quad (1.2)$$

- де ΔH – загальна втрата напору, м;
 ΔH_l – лінійна втрата напору;
 ΔH_m – місцева втрата напору;

Лінійні втрати описуються виразом:

$$\Delta H_l = \beta * R * l \quad (1.3)$$

- де R – питома втрата тиску на тертя, Па/м;
 l – довжина трубопроводу, м;
 β – коефіцієнт стану труби.

Місцеві втрати розраховуються за формулою:

$$\Delta H_m = \sum \xi * \frac{v^2}{2g} \quad (1.4)$$

- де ξ – коефіцієнт місцевого опору;
 v – швидкість потоку в трубі, м/с.

1.4.3 Вплив гідравліки на працездатність споживачів

Наявний перепад тиску у точці приєднання споживача (тобто різниця між подачею та зворотом) визначає можливість подачі необхідної витрати теплоносія в опалювальну систему. Для споживачів із елеваторними вузлами він має перевищувати 20 м вод. ст., а для ІТП — достатньо 4–6 м.

Якщо втрати напору по трасі більші, ніж може компенсувати насосне обладнання, або ділянка неузгоджена гідравлічно — в точці приєднання буде недостатній тиск. У результаті:

- зниження циркуляції через радіатори;
- гідравлічне відставання частини стояків;
- холодні верхні поверхи або вся будівля.

Тому вже на етапі проєктування забезпечується гідравлічне ув'язування мережі з урахуванням гідравлічного опору, довжини траси, кількості місцевих опорів і забезпечення мінімального гарантованого тиску для споживачів у найвіддаленіших точках.

Гідравлічні розрахунки — основа надійної і збалансованої роботи тепломережі. Правильне застосування базових параметрів - (Q, H, R, ξ) дозволяє забезпечити нормальну циркуляцію теплоносія, мінімізувати перевитрати електроенергії на перекачування і запобігти гідравлічній розбалансованості [74]. Ці основи є фундаментом для подальших розділів дисертації.

1.5 Теплові режими систем тепlopостачання

1.5.1 Температурний графік теплових мереж

Одним з ключових понять теплового режиму є температурний графік — залежність температури теплоносія у подавальному і зворотному трубопроводах від температури зовнішнього повітря. Іншими словами, це розрахункова крива, що визначає, яку температуру подачі і зворотки має забезпечити джерело тепла за різних погодних умов. Такий графік встановлюється при проєктуванні системи і залежить від кліматичних параметрів (наприклад, розрахункової зимової температури зовнішнього повітря) та вимог до підтримання нормативної внутрішньої температури приміщень. Якісне регулювання теплоносія у централізованих мережах здійснюється саме шляхом зміни його температури відповідно до цього графіка за відносно постійної витрати. При низькій температурі надворі джерело підвищує температуру подачі, і навпаки — в теплі

дні температура подачі знижується. В результаті теплова потужність, що передається споживачам, адаптується до потреб опалення та визначається наступним рівнянням:

$$Q = G * c * \Delta t \quad (1.5)$$

де Q – теплова енергія, кВт;
 G – витрата теплоносія, м³/год;
 c – теплоємність, кДж/(кг * °С);
 Δt – різниця температур, °С;

Таким способом досягається підтримання комфортної температури в будівлях без ручного втручання. На рисунку 1.2 наведено типовий температурний графік 150/70 °С: видно, що зі зниженням зовнішньої температури потрібна вища температура води в подавальному трубопроводі, тоді як зворотна лінія змінюється більш полого.

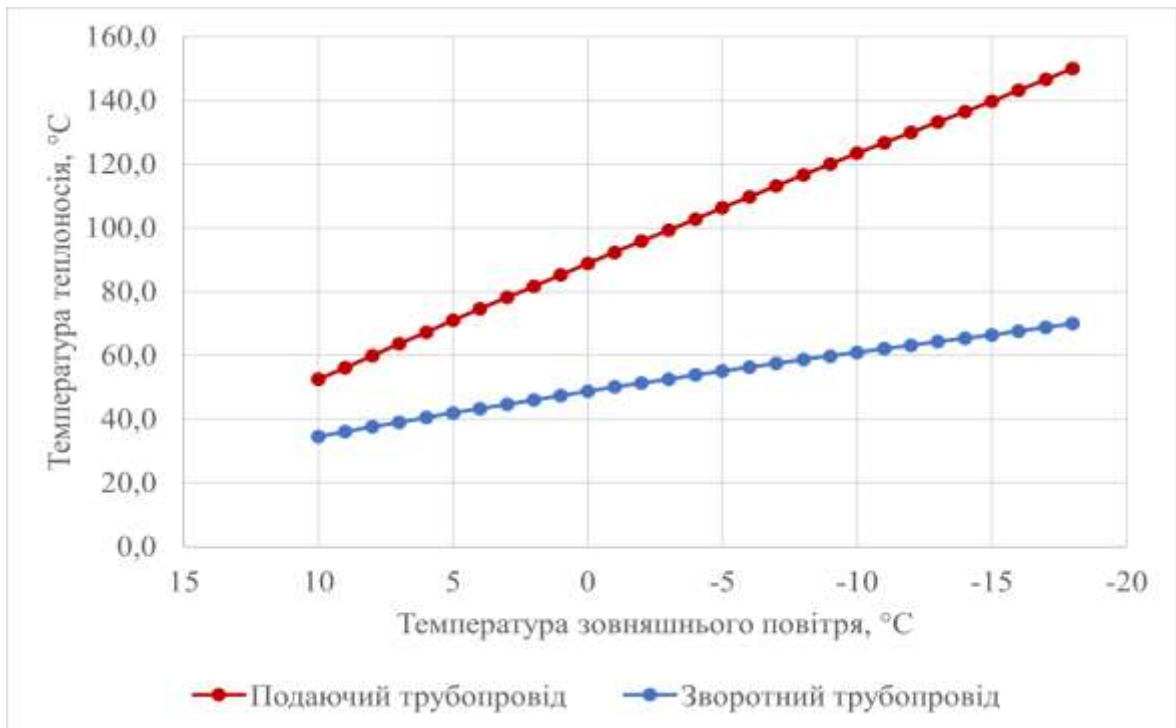


Рисунок 1.2 – Залежність температурного графіку 150/70°С від температури зовнішнього повітря

Для заданого графіка при розрахунковому морозі (близько $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$) подача сягає $150\text{ }^{\circ}\text{C}$, а зворотна вода охолоджується до $70\text{ }^{\circ}\text{C}$; при більш м'яких умовах (наприклад, $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ зовні) температура подачі знижується до $\sim 89\text{ }^{\circ}\text{C}$, зворотної – до $\sim 49\text{ }^{\circ}\text{C}$, що відповідає приблизно 45 % розрахункового навантаження системи опалення.

Температурний графік вибирається залежно від типу системи та вимог споживачів. Історично системи опалення багатоквартирних будинків висотою до 9–10 поверхів [75] проєктувалися під графік $95/70\text{ }^{\circ}\text{C}$, а для будівель більшої поверховості застосовували дещо вищі параметри (наприклад, $105/70\text{ }^{\circ}\text{C}$). У сучасних індивідуальних системах опалення житлових будинків приймають ще нижчі графіки ($80/60$ чи $90/70$) з метою підвищення енергоефективності та безпеки. Водночас для магістральних міських тепломреж середини ХХ століття характерними були високотемпературні графіки – зокрема, $130/70\text{ }^{\circ}\text{C}$ та $150/70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Застосування більш високої температури подачі дозволяло транспортувати великі теплові навантаження на значну відстань і жити теплоносієм значну кількість споживачів без перевищення пропускної здатності труб. Наприклад, тепломрежа з графіком $150/70\text{ }^{\circ}\text{C}$ при розрахунковому мінімумі зовнішньої температури (близько $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$) повинна подавати воду з температурою $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ і приймати зворотну воду $70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Однак такі параметри перевищують допустимі для безпосередньої подачі в опалювальні прилади споживачів. Тому перегрітий теплоносій (тобто вода з температурою вище потрібної для опалення) в старих системах подавали через елеваторні вузли змішування: частина перегрітої води змішувалася зі зворотною, що дозволяло отримати на виході елеватора воду потрібної температури для системи опалення (наприклад, $95\text{ }^{\circ}\text{C}$). В сучасних системах централізованого теплопостачання тенденція полягає в переході на нижчі графіки, оскільки зменшення температури подачі знижує теплові втрати мережі та покращує умови роботи обладнання (насосів, трубопроводів, теплообмінників) [76]. На рисунках 1.3 та 1.4 показано залежність температурних графіків $130/70$ та $95/70$ відповідно, від температури зовнішнього повітря.

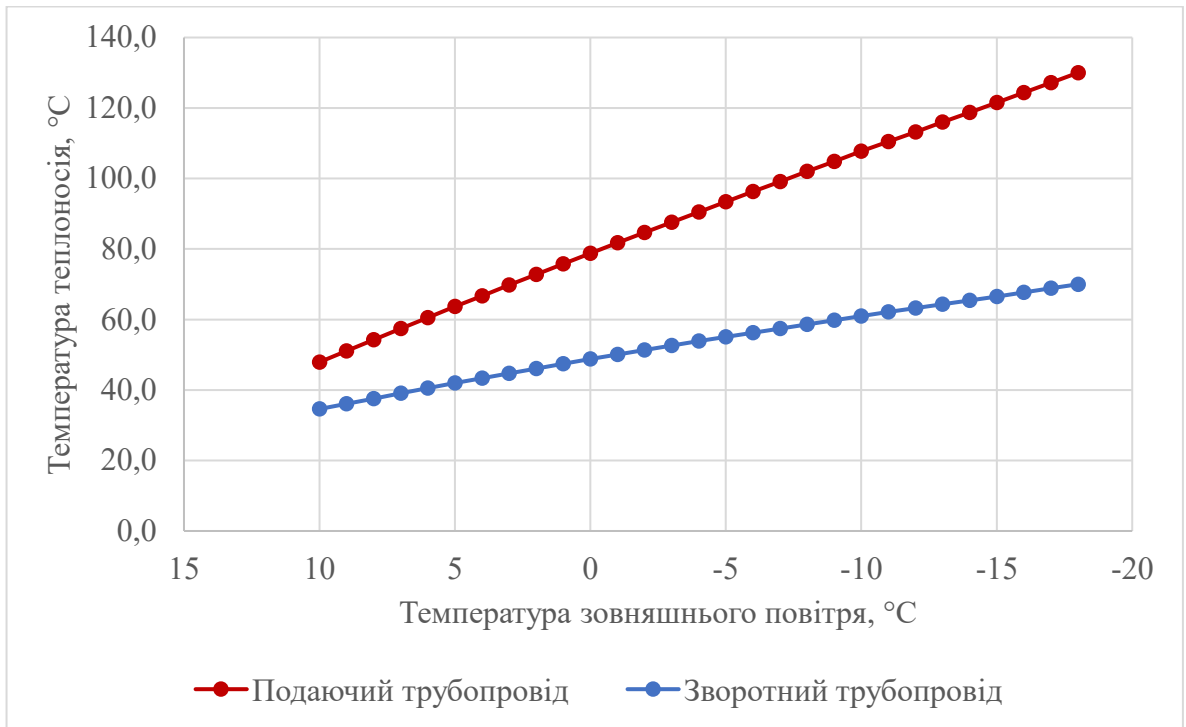


Рисунок 1.3 – Залежність температурного графіку 130/70°C від температури зовнішнього повітря

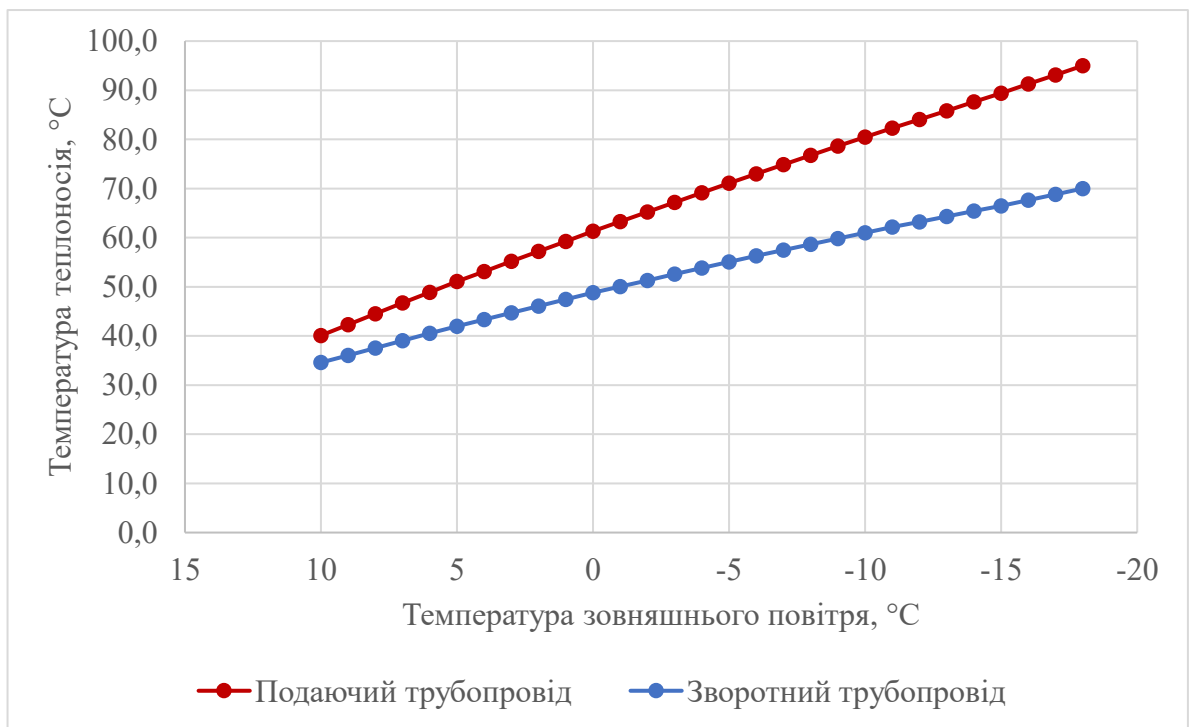


Рисунок 1.4 – Залежність температурного графіку 95/70°C від температури зовнішнього повітря

1.5.2 Графік теплового навантаження і “режимний день”.

Окрім погодної варіації теплового режиму, для систем тепlopостачання важливою є добова динаміка теплового навантаження [77]. Графік теплового навантаження – це залежність споживання теплової потужності від часу протягом доби. Такий добовий графік опалення використовується для аналізу і оптимізації режимів роботи теплових мереж і джерел: наприклад, за наявності акумуляції тепла або регулювання генеруючої потужності можна згладити піки навантаження, підвищуючи загальну ефективність [78]. Поняття “режимного дня” означає умовний розрахунковий день, для якого задано характерний графік навантаження. Як правило, режимним вибирають найхолодніший будній день опалювального періоду, аби оцінити роботу системи в умовах максимального тепло-споживання. За результатами режимного дня визначаються необхідні параметри роботи обладнання: наприклад, максимальні витрати палива, графік роботи насосів, ступені навантаження котлів тощо. Нормативні документи вимагають врахування добових коливань: згідно з ДБН, у будівлях, де допускається зниження температури вночі або у неробочий час, слід передбачати програмне регулювання – автоматичну зміну температури або витрати теплоносія за часовим графіком доби. Сучасні системи автоматики дозволяють реалізувати такі режимні карти для тепlopунктів: контролери можуть зменшувати температуру подачі на певну величину залежно від часу доби і дня тижня, що практикується в школах, офісах, промислових об’єктах з фіксованим розкладом роботи. Таким чином, графік теплового навантаження та режимний день є інструментами для адаптації системи тепlopостачання до реального характеру споживання тепла впродовж доби, забезпечуючи належний комфорт і економію енергоресурсів без прив’язки до конкретного міста чи об’єкта.

1.6 Існуючі підходи до балансування та регулювання в міських теплових мережах

У сучасних системах теплопостачання міста застосовуються різні підходи до балансування мережі (гідравлічного і теплового) та регулювання теплових параметрів. Балансування теплової мережі означає сукупність дій, спрямованих на підтримання рівномірного розподілу теплоносія і забезпечення потрібних теплових режимів для всіх споживачів. Ефективне балансування і належне регулювання дають змогу досягти стабільної роботи системи, мінімізувати тепловтрати та забезпечити комфортне теплопостачання кожного будинку. Водночас, кожен підхід має свої можливості і обмеження, і вибір оптимального рішення залежить від специфіки мережі.

1.6.1 Гідравлічне балансування

Гідравлічне балансування відповідає за вирівнювання витрат і тиску теплоносія в різних ділянках мережі. Його мета – гарантувати, що кожен споживач отримує необхідну кількість теплоносія навіть за несприятливого розташування в мережі. Для цього застосовуються технічні засоби: статичні балансувальні пристрої (дросельні шайби, ручні балансувальні клапани) та автоматичні регулятори перепаду тиску або витрати [79, 80]. У традиційних мережах минулих поколінь балансування здійснювалося переважно статично – шляхом ручного налаштування дроселів на трубопроводах для обмеження витрати. Такий підхід забезпечує розрахунковий розподіл потоків при проєктному навантаженні, проте не може адаптуватися до динамічних змін. Сучасні системи переходять до динамічного гідравлічного балансування: на будинкових вводах встановлюються автоматичні регулятори, зокрема в складі індивідуальних теплових пунктів (ІТП), які підтримують постійний заданий перепад тиску або лімітують витрату для кожного споживача. Це дозволяє уникнути перевитрати теплоносія в ближчих до джерела тепла будівлях і дефіциту у віддалених. Гідравлічно збалансована мережа працює ефективніше: усі споживачі

отримують достатній потік теплоносія, відсутнє «перегрівання» близьких точок і «охолодження» дальніх, а середній перепад температур (Δt) підтримується ближче до розрахункового. Натомість гідравлічний дисбаланс призводить до того, що віддалені споживачі можуть не отримувати потрібної температури, і для компенсації оператор вимушений підвищувати подачу тепла загальною мережею. Це знижує енергоефективність: малий температурний напір (висока зворотна температура) погіршує ККД джерел тепла та підвищує витрати палива. Первинне налаштування мережі є обов'язковою умовою надійної роботи: воно створює рівні гідравлічні умови для всіх споживачів і продовжує термін служби обладнання. Додатково, обмеження надлишкового потоку теплоносія та контроль температури зворотної води в ІТП дають змогу знизити тепловтрати і покращити тепловий баланс мережі.

1.6.2 Теплове балансування

Поняття теплового балансування стосується вирівнювання розподілу теплоти відповідно до потреб споживачів. Якщо гідравлічне балансування гарантує подачу потрібного об'єму води, то теплове – забезпечує, щоб кожен споживач отримав саме стільки тепла, скільки йому потрібно, без перегріву або недогріву. Досягнути цього можна за рахунок правильного регулювання температурних режимів. Наприклад, балансування по теплу передбачає підтримання заданого температурного графіка та проєктного (Δt) у кожній гілці: коли теплоносій проходить через усі прилади, він має охолоджуватися приблизно на розрахункову величину. У практичному вираженні теплове балансування здійснюється засобами автоматизації: локальні терморегулятори на опалювальних приладах підтримують температуру повітря в приміщеннях і тим самим не допускають зайвого відбору тепла, а контролери ІТП обмежують температуру теплоносія, що повертається в мережу, змішуючи охолоджену воду з подачею. Таким чином, теплове балансування є фактично результатом

коректної роботи системи регулювання: воно забезпечує рівномірний прогрів усіх приміщень і оптимальне використання теплової енергії без її перевитрати.

1.6.3 Централізоване регулювання

Регулювання теплової мережі – це процес оперативного керування параметрами теплоносія з метою підтримання балансу між виробленою і спожитою тепловою енергією. Існують дві принципово різні схеми: централізоване регулювання (на джерелі тепла) та децентралізоване, або локальне, регулювання (безпосередньо на боці споживача). Централізоване регулювання традиційно здійснюється в декількох режимах:

Якісне регулювання – зміна температури теплоносія, що подається в мережу, при постійній витраті. Цей метод історично найпоширеніший у великих системах: тепла потужність регулюється за допомогою температурного графіка залежно від температури зовнішнього повітря. Водночас мережеві насоси працюють на постійну подачу, підтримуючи сталий тиск у мережі. Якісне регулювання просте в реалізації і забезпечує синхронну зміну теплового режиму для всіх споживачів одночасно. Однак його недоліком є те, що при одному температурному графіку не враховуються індивідуальні особливості будівель: частина споживачів може отримувати надлишок теплоти, тоді як інші – недостатньо, якщо їх теплові втрати відрізняються від середніх. Крім того, за малої потреби в теплі (міжсезоння) постійна витрата призводить до невиправдано високих тепловтрат у мережі та зайвого споживання електроенергії на перекачування.

Кількісне регулювання – зміна кількості теплоносія при постійній заданій температурі [81]. Реалізується зазвичай шляхом зміни частоти обертів насосів на джерелі тепла. Теоретично, кількісне регулювання дозволяє зменшити прокачування води через мережу при зниженні навантаження, тим самим зекономити електроенергію насосів і знизити втрати тепла в трубопроводах. Перевагою такого методу є більш безпосередня відповідність подачі – попиту:

при падінні потреби в теплі масова витрата зменшується, і мережа транспортує менше гарячої води. Однак у чистому вигляді кількісне регулювання в централізованих системах майже не застосовується через складність забезпечення рівномірності: у розгалуженій мережі при зміні подачі води тиск і витрата розподіляються нерівномірно. Близькі до джерела споживачі можуть отримати надмірний тиск, а віддалені – зіткнутися з дефіцитом тепла, якщо мережа не була ідеально гідравлічно збалансована. Тому кількісне регулювання практично завжди поєднується з іншими заходами – якісним або локальним управлінням – і потребує впровадження автоматичних регуляторів перепаду тиску, які утримують гідравлічну стійкість при зміні витрати.

Комбіноване якісно-кількісне регулювання – поєднання двох вищезазначених методів, коли одночасно чи по чергово регулюються і температура, і витрата теплоносія. Такий підхід набув актуальності в умовах модернізації систем: зокрема, запропоновано схеми, де за низьких зовнішніх температур діє центральне якісне регулювання за стандартним графіком, а в перехідні періоди відбувається переключення на кількісний режим – зниження подачі теплоносія насосами. Комбіноване регулювання дозволяє гнучко реагувати на зміну навантаження: уникнути як перегрівів при малих морозах, так і надмірного циркуляції води при плюсовій температурі надворі. Перевагою є підвищення загальної ефективності і стабільності системи – зменшуються як тепловтрати, так і ризик гідравлічних ударів при масовому закритті споживачів. Недоліком виступає ускладнення системи керування: потрібна точна автоматизація, два рівні контролю та алгоритм перемикавання режимів, що збільшує вартість і вимоги до експлуатації [82].

1.6.4 Локальне регулювання

Локальне регулювання – це децентралізований підхід, при якому керування відпуском теплоти здійснюється на рівні окремих будівель або навіть приміщень [83]. Кожний споживач оснащується власним регуляторним

обладнанням, що дозує отримання тепла відповідно до актуальної потреби. Найпоширенішим прикладом є автоматизовані індивідуальні теплові пункти в будівлях, які містять регулюючий клапан змішування для системи опалення і, за необхідності, теплообмінники та клапани для ГВП. У міжнародних проєктах модернізації теплопостачання ІТП розглядаються як базовий елемент підвищення енергоефективності. ІТП підтримує температуру теплоносія, що подається в опалювальну систему будівлі, згідно з налаштованим температурним графіком, реагуючи на зміну погоди. Одночасно він може обмежувати витрату – фактично кожна будівля «бере» з міської мережі лише стільки теплоносія, скільки потрібно для покриття її навантаження у даний момент. Інший рівень локального регулювання – термостатичні радіаторні вентиля (TRV) у квартирах, які автоматично підтримують задану температуру повітря, змінюючи протікання води через радіатори. Локальне (квартирне) регулювання дозволяє врахувати індивідуальні потреби і уникнути перегріву окремих приміщень: якщо в кімнаті тепліше за встановлену норму, клапан закривається і припиняє подачу теплоносія, заощаджуючи тепло. Сильними сторонами локального регулювання є підвищення комфорту та енергоефективності: тепло-споживання зменшується там, де потреба фактично нижча. Крім того, децентралізація регулювання підвищує надійність: відмова одного вузла впливає лише на конкретного споживача, а не на всю систему.

Водночас, локальне регулювання висуває нові вимоги до роботи всієї мережі. По-перше, масове впровадження ІТП і TRV змінює гідравлічний режим: при зменшенні теплового навантаження багато місцевих клапанів частково або повністю зачиняються, що спричиняє різке зниження загальної витрати теплоносія в мережі. Якщо насоси продовжують працювати з постійною продуктивністю, це веде до зростання тиску у подаючих магістралях, виникнення надлишкового перепаду тиску біля джерела тепла і розбалансування тих будинків, де регулятори відсутні. Іншими словами, централізоване та локальне регулювання без координації починають протидіяти одне одному. Яскравий приклад – ситуація в періоди середньої температури зовнішнього, коли

автоматичні вузли на будинках масово обмежують подачу: за відсутності змін з боку джерела це призводить до переливу гарячої води через байпаси або до перегріву близьких ділянок, тоді як віддалені можуть все одно недоотримати теплоносій через падіння циркуляції. По-друге, для коректної роботи локальних регуляторів мережа має бути гідравлічно стабілізована: потрібна установка регуляторів перепаду тиску на вводах, використання насосів з частотним перетворювачем тощо. Без цих заходів можливі коливання тиску, що заважають нормальній роботі TRV і можуть викликати гідроудари або шум в обладнанні. Таким чином, впровадження локального регулювання обов'язково супроводжується модернізацією центрального контуру керування: перехід на змінні витрати з частотним регулюванням насосів, адаптація температурного графіка, встановлення балансувальних клапанів. Дослідження показують, що ефективність регулювання витрати значною мірою залежить від внутрішніх характеристик регулюючих клапанів. Лише за умови інтегрованого підходу локальні й центральні методи не конфліктують, а взаємодоповнюють одне одного, підвищуючи ефективність системи загалом.

В таблиці 1.2 наведено порівняння основних підходів до балансування і регулювання теплових мереж, що узагальнює їх принцип дії, сильні сторони та недоліки.

Таблиця 1.2 (початок)

Порівняння підходів до балансування і регулювання теплових мереж

Метод	Принцип дії	Переваги	Обмеження
Централізоване якісне регулювання (температурне)	Зміна температури теплоносія	Простота і єдина точка керування всією мережею; стабільний гідравлічний режим	Не враховує різні потреби споживачів, перегріву/недогріву, зайві тепловтрати і витрати електроенергії на прокачування
Централізоване кількісне регулювання (об'ємне)	Зміна витрати теплоносія	Зменшення витрат електроенергії на насосне обладнання та скорочення тепловтрат у мережі за часткового навантаження	Складність рівномірного забезпечення теплом без локальних регуляторів; потребує гідравлічного балансування

Таблиця 1.2 (закінчення)

Метод	Принцип дії	Переваги	Обмеження
Комбіноване центральне регулювання (якісно-кількісне)	Поєднане: зміна температури та витрати залежно від умов	Гнучке реагування на зміну зовнішньої температури і навантаження; оптимізація теплового режиму в міжсезоння; поєднання переваг обох підходів	Ускладнення системи автоматики; вища вартість реалізації та потреба в кваліфікованому обслуговуванні
Локальне регулювання (децентралізоване, ІТП і ТРВ)	Автоматичне регулювання відпуску тепла безпосередньо на боці споживача відповідно до потреби теплового навантаження	Точне задоволення потреб кожного споживача; усунення перегрівів, економія тепла і підвищення комфорту; можливість зонального керування будівлями	Без узгодження з центральним контуром може викликати гідравлічний дисбаланс; потребує оснащення кожної будівлі додатковим обладнанням; необхідне постійне технічне обслуговування
Гідравлічне балансування (статичне)	Одноразове налаштування мережі на проєктні витрати за допомогою дросельних шайб або ручних клапанів	Низька вартість і простота реалізації; забезпечує проєктний розподіл витрат при номінальному режимі роботи системи	Не адаптується до зміни режимів споживання; в непроєктних умовах баланс порушується, потрібне повторне налаштування після реконструкції або змін навантажень
Гідравлічне балансування (динамічне)	Підтримання балансу в реальному часі за допомогою автоматичних регуляторів перепаду тиску та витрати в мережі	Стабільний розподіл теплоносія при змінному навантаженні; зниження коливань тиску і температур, кращі умови для роботи локальних регуляторів	Вимагає додаткових витрат на обладнання та його наладку; підвищує складність системи і потребує кваліфікованого обслуговування; у разі відмови регулятора можливе локальне порушення балансу

Як видно, універсального рішення не існує [84] – кожен підхід має свої сильні сторони і обмеження. Центральне (якісне) регулювання гарантує цілісність системи, але не враховує місцеві особливості; локальне управління підвищує ефективність у споживача, проте потребує адаптації мережі; гідравлічне балансування є необхідною основою, але саме по собі не забезпечує економії без належного регулювання тепла. У практиці оптимальним виявляється комплексне застосування методів: сучасні міські тепломережі проєктуються з

урахуванням якісного регулювання на джерелі, оснащуються автоматизованими ІТП у споживачів, а для узгодження їх роботи впроваджується динамічне балансування і частотне керування насосами. Лише такий системний підхід дозволяє досягти стійкого режиму роботи мережі за будь-яких умов та максимальної енергоефективності без втрати надійності.

1.7 Класи регуляторів перепаду тиску та витрати теплоносія

Стабільна робота систем централізованого теплопостачання значною мірою залежить від застосування відповідних регулюючих пристроїв. За принципом дії регулятори параметрів теплоносія можна поділити на три основні класи: регулятори перепаду тиску, регулятори витрати та комбіновані регулятори. Кожен із цих класів має власний принцип функціонування та сферу використання, а також характерні обмеження й проблеми, що проявляються за нестабільних режимів чи малих витрат теплоносія.

На рисунку 1.5 показано поділ регулюючих пристроїв на три основні групи: регулятори перепаду тиску, регулятори витрати та комбіновані регулятори.



Рисунок 1.5 – Класифікація регуляторів за принципом дії

Така класифікація відображає різні підходи до підтримання гідравлічної рівноваги: від прямої дії до автоматизованого керування із використанням приводів, а також гібридні рішення, що інтегрують кілька функцій в одному вузлі.

1.7.1 Регулятори перепаду тиску

Регулятори перепаду тиску належать до пристроїв прямої дії, призначених для автоматичного підтримання стабільної різниці тисків на певній ділянці мережі або на вході до системи опалення споживача. Їхній принцип роботи заснований на балансуванні сили, що діє на мембрану, пружиною з заданою жорсткістю. При зростанні тиску перед регулятором мембрана переміщується, стискаючи пружину, і клапан частково прикривається; при зниженні тиску – пружина розширюється, відкриваючи клапан. За рахунок цього забезпечується постійний перепад тиску незалежно від коливань у магістралі. Таким чином, регулятор перепаду тиску підтримує сталі гідравлічні умови для споживача, автоматично реагуючи на зміни в мережі.

Конструктивно диференційні регулятори тиску зазвичай складаються з клапана та мембранного приводу. На практиці поширеними є модульні виконання, де регулятор встановлюється разом із клапаном необхідного діаметра. Наприклад, пристрої серії AFP2 фірми Danfoss містять клапан типу VFG2 у парі з мембранним блоком AFP2. Завдяки простій конструкції та надійності такі регулятори широко застосовуються у ІТП та модернізованих ЦТП. Основними перевагами є стабільність роботи без зовнішнього живлення і здатність функціонувати в широкому діапазоні тисків.

1.7.2 Регулятори витрати теплоносія

Регулюючі клапани служать для плавного дозування витрати теплоносія відповідно до потреби споживача. Як правило, це двоходові клапани з керованим затвором, положення яких змінюється або вручну, або за допомогою

електричних приводів від системи автоматики. Представником цього класу є серія клапанів VFG 2, що використовуються в теплових пунктах для регулювання подачі теплоносія. Вони характеризуються певною витратною [85] характеристикою, що визначається профілем штока і конструкцією сідла клапана. Нелінійна характеристика дає змогу досягти більш рівномірного регулювання потужності системи по всьому діапазону відкриття клапана.

У централізованих теплових мережах клапани VFG 2 найчастіше встановлюються в ІТП для підтримання необхідної температури теплоносія – зокрема, регулювання температури зворотної води через зміну витрати гарячого теплоносія на змішувачі або теплообміннику. Сучасні електроприводи (як-от АМЕі 6 іNET для VFG 2) дозволяють точно позиціонувати клапан, що забезпечує високу точність підтримання параметрів.

Важливо зазначити, що ефективність роботи клапана залежить від гідравлічних умов у точці його встановлення. Зокрема, стабільність регулювання напряму залежить від наявності постійного перепаду тиску перед клапаном. Якщо тиск на вході суттєво коливається, навіть найкращий за характеристиками клапан буде вимушений працювати на малих відкриттях, що може призводити до ривків потоку, шуму та прискореного зношення. Тому в типовій схемі ІТП регулюючий клапан (VFG 2) встановлюється у парі з регулятором перепаду тиску (AFP2): перший керує витратою, а другий гарантує стабільний перепад тиску на цьому клапані. Така зв'язка «клапан + регулятор перепаду» забезпечує тиско-незалежний характер регулювання: клапан може плавно змінювати подачу, не виходячи за межі робочої зони, оскільки надлишковий тиск скидається регулятором перепаду.

Серед експлуатаційних обмежень регулюючих клапанів – можливість кавітації при великому перепаді тиску на дроселі та чутливість до забруднень. Якщо різниця тисків на клапані перевищує рекомендовану, у зоні звуження потоку можуть виникати кавітаційні явища, що спричиняють шум і ерозію матеріалу. Цю проблему також вирішує встановлення регулятора перепаду, який гасить зайвий тиск. Крім того, для забезпечення проєктних характеристик

клапана важливо, щоб його відкриття на номінальній витраті знаходилося в середньому діапазоні (близько 30–70% ходу штока). Якщо ж клапан змушений постійно працювати майже закритим, точність регулювання погіршується, а невеликі зміни положення штока будуть викликати непропорційно великі коливання витрати. Таким чином, правильний вибір розміру (K_{vs}) та наявність стабілізації перепаду тиску є ключовими умовами надійної роботи регулюючих клапанів у широкому діапазоні режимів.

1.7.3 Регулятори комбінованого типу

Комбіновані регулятори витрати поєднують функції обмеження витрати та підтримання перепаду тиску в одному пристрої. Це інтегровані вузли типу «2 в 1», які забезпечують практично сталу витрату теплоносія у споживача незалежно від коливань тиску в мережі. Конструктивно такі регулятори містять дросельний елемент із налаштуванням максимальної витрати та вбудований мембранний регулятор перепаду тиску, що підтримує сталу різницю тисків на дроселі. Завдяки цьому реалізується тиско-незалежне регулювання: навіть за змін мережевого тиску витрата через споживача залишається близькою до заданого значення.

Типовим представником є клапан [86] AFQMP 2, який має вузол обмеження максимальної витрати та мембрану з пружиною для утримання перепаду тиску. За потреби він може оснащуватися електроприводом, що дозволяє не лише обмежувати, а й модулювати витрату, зберігаючи функцію автоматичного балансування.

Основна сфера застосування комбінованих регуляторів ІТП малих і середніх споживачів, де важливо спростити гідравлічне балансування. Використання одного пристрою замість окремого регулюючого клапана та регулятора перепаду зменшує кількість елементів, спрощує монтаж і наладку. В умовах динамічних навантажень такі клапани автоматично стабілізують гідравлічний

режим конкретного споживача: при зростанні тиску обмежують витрату, а при його падінні — відкриваються, підтримуючи подачу в заданих межах.

Водночас комбіновані регулятори мають суттєві обмеження. Вони розраховані на визначені діапазони витрат і перепадів тиску; вихід за ці межі призводить до втрати незалежності від тиску. За малих витрат, характерних для невеликих будівель у теплу погоду чи при частковому навантаженні витрата стає чутливою до коливань тиску. У сучасних роботах відзначається, що при нерівномірних навантаженнях традиційні регулювальні рішення можуть втрачати стабільність роботи. Фактично він починає поводитися як звичайний, залежний від тиску клапан, що може викликати зрив циркуляції та шуми. Крім того, для коректної роботи потрібен мінімальний перепад тиску (порядку 0,1 бар). При його нестачі витрата падає, а при надлишку можливі шум і кавітація. Практичний досвід експлуатації показав, що для дуже малих споживачів або за нестабільних режимів комбіновані клапани можуть не забезпечувати проєктну витрату.

Альтернативою є схема з окремого регулюючого клапана та регулятора перепаду тиску (наприклад, VFG2 + AFP2). Вона складніша в монтажі, але забезпечує кращу стабільність при малих витратах. Отже, комбіновані регулятори ефективні лише в певних умовах, а вибір рішення має базуватися на реальних гідравлічних режимах, діапазоні навантажень і стані мережі.

Отже, кожен клас регуляторів має свої сильні сторони і обмеження, і вибір між ними залежить від конкретних умов: діапазону зміни теплового навантаження, віддаленості та гідравлічного стану мережі, вимог до точності підтримання параметрів тощо. Безумовно, правильне поєднання різних типів регуляторів (наприклад, місцеве регулювання витрати плюс загальне балансування перепаду тиску) дозволяє досягти оптимального результату в плані енергоефективності та надійності теплопостачання, тому не існує універсального «найкращого» варіанта – кожен випадок потребує окремого аналізу. У таблиці 1.3 підсумовано основні класи регуляторів, сфери їх застосування та характерні експлуатаційні обмеження.

Класи регуляторів, їх типові області застосування та обмеження

Клас регулятора	Типові області застосування	Експлуатаційні обмеження
Регулятори перепаду тиску	ІТП та модернізовані ЦТП для підтримання сталого перепаду тиску на будинках або секціях мережі.	Не регулюють витрату, а підтримують перепад тиску; потребують мінімального протоку для стабільної роботи.
Регулюючі клапани	ІТП для плавного регулювання витрати теплоносія з метою підтримання температури або обмеження потужності; працюють у складі систем автоматики; застосовуються разом з регулятором перепаду тиску.	Ефективні лише за умови стабільного вхідного тиску; без регулятора перепаду тиску виникають коливання та шум; ризик кавітації при великому перепаді тиску; потребують правильного підбору під конкретний перепад.
Комбіновані регулятори	ІТП споживачів для автоматичного підтримання заданої максимальної витрати незалежно від коливань тиску; спрощення гідравлічного балансування без додаткових клапанів.	Обмежений діапазон стабільної роботи: при надто малих витратах або значних коливаннях перепаду можуть втрачати тиско-незалежність; вимагають мінімального перепаду для нормальної роботи; можливі шум і нестабільність при виході за межі робочого діапазону.

1.8 Традиційні теплові вузли та їх експлуатаційні обмеження

Традиційні теплові вузли споживачів у системах централізованого тепlopостачання історично формувались у період стабільних гідравлічних і теплових режимів роботи мереж. Найпоширенішим типом такого вузла є елеваторний тепловий вузол, який і нині експлуатується на значній кількості житлових та громадських будівель. Його застосування було обумовлене простотою конструкції, відсутністю потреби в зовнішньому електроживленні та мінімальними вимогами до обслуговування [87-89].

Принцип роботи елеваторного вузла ґрунтується на використанні енергії перепаду тиску в тепловій мережі. Через сопло елеватора мережевий теплоносій надходить з підвищеною швидкістю, створюючи зону розрідження, за рахунок чого здійснюється підсмоктування частини зворотного теплоносія із системи опалення споживача. У камері змішування формується суміш із зниженою температурою, яка подається в систему опалення будівлі. Таким чином, елеватор одночасно виконує функції редукції температури та циркуляції теплоносія в контурі споживача.

Ключовою особливістю елеваторного вузла є його жорстка залежність від наявного перепаду тиску між подавальним і зворотним трубопроводами теплової мережі. Працездатність елеватора забезпечується лише в обмеженому діапазоні перепадів тиску, достатніх для створення необхідного коефіцієнта підмішування. Зменшення перепаду тиску призводить до порушення процесу підсмоктування, зниження витрати теплоносія через систему опалення та, як наслідок, до недогріву приміщень. Надмірне зростання перепаду тиску, у свою чергу, може викликати гідравлічну нестабільність і перевищення допустимих режимів роботи внутрішніх систем.

Ще одним принциповим обмеженням елеваторних вузлів є відсутність гнучкого регулювання теплового навантаження. Регулювання, як правило, зводиться до ручної заміни сопел або встановлення шайб, що є трудомістким, неточним і непридатним для оперативної адаптації до змін зовнішніх умов. У реальних експлуатаційних умовах це призводить до ситуацій, коли тепла подача не відповідає поточним потребам споживача, особливо в перехідні періоди опалювального сезону.

В умовах сучасних теплових мереж, які характеризуються зростаючою нерівномірністю навантажень, наявністю віддалених і малих споживачів, а також частими відхиленнями гідравлічних режимів від проєктних, експлуатаційні обмеження елеваторних вузлів стають критичними. Вони виявляються у нестабільності температурного режиму, підвищеній чутливості до гідравлічних перекосів мережі та неможливості інтеграції з сучасними системами

диспетчерського керування. На рисунку 1.6 наведено поздовжній розріз типового елеватора.

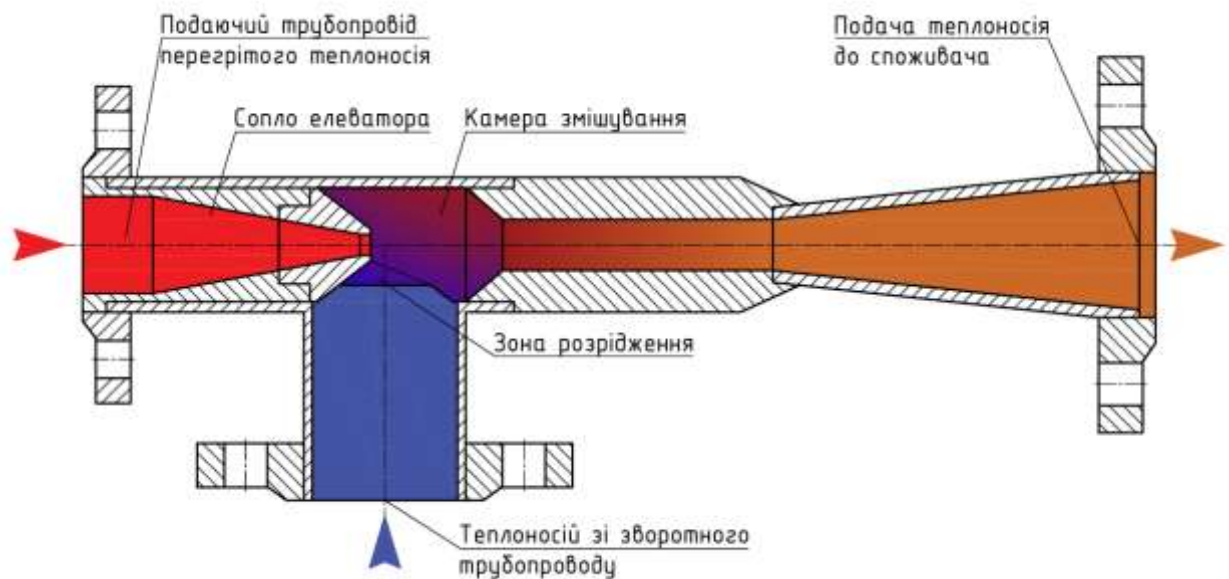


Рисунок 1.6 – Поздовжній розріз типового елеватора

Таким чином, елеваторні теплові вузли, незважаючи на свою конструктивну простоту та історичну доцільність, не відповідають вимогам сучасних умов експлуатації систем тепlopостачання. Їх обмежені регулювальні можливості та жорстка залежність від мережевих параметрів обґрунтовують необхідність переходу до більш гнучких рішень локального регулювання, що і зумовлює подальший розгляд сучасних індивідуальних теплових пунктів у наступних розділах дисертації [90-92].

Висновки до розділу

У розділі виконано системний аналіз сучасного стану централізованих систем тепlopостачання та виявлено комплекс взаємопов'язаних технічних і експлуатаційних проблем, що обмежують ефективність і керованість міських теплових мереж. Узагальнення результатів дозволяє сформулювати такі ключові положення:

1. Гідравлічна нерівномірність мережі є наслідком зношеності інфраструктури, роботи за принципом постійної витрати та відсутності

комплексного балансування. Це призводить до надлишкового тиску в частині споживачів і його дефіциту у віддалених ділянках, що формує нестабільність теплопостачання.

2. Елеваторні теплові вузли не забезпечують регулювання витрати й перепаду тиску, працюють у вузькому діапазоні режимів та демонструють високу чутливість до змін у магістралі. Їх конструктивні обмеження не відповідають сучасним вимогам гнучкості й керованості.
3. Сучасні автоматичні регулятори підвищують локальну стабільність, однак мають експлуатаційні межі. За малих витрат або нестабільного тиску вони втрачають регулювальну здатність, що супроводжується коливаннями витрати, шумом та ризиком кавітації.
4. Відсутність комплексного підходу до модернізації призводить до нових дисбалансів: локальна автоматизація без адаптації магістрального контуру може викликати надлишковий тиск, гідроудари та розбалансування режимів.
5. Існуючі методи забезпечують або гідравлічну стабільність, або локальну енергоефективність, проте не дозволяють реалізувати керований пріоритетний розподіл теплової потужності між споживачами різної критичності в умовах дефіциту енергоресурсів.
6. Стан питання підтверджує необхідність розроблення алгоритмічного підходу, що поєднує гідравлічне балансування, стабілізацію перепадів тиску, адаптивне регулювання витрати та механізм пріоритетного розподілу теплової енергії без порушення загальної рівноваги мережі.

Таким чином, результати аналізу обґрунтовують наукову задачу створення комплексного алгоритму підвищення ефективності й керованості теплової мережі з урахуванням гідравлічного балансування та пріоритетності споживачів. Сформульовані вимоги визначають напрям подальших досліджень, що реалізуються у наступному розділі дисертації шляхом розроблення гідравлічно-теплової моделі та алгоритму пріоритетного регулювання.

2 ГІДРАВЛІЧНО-ТЕПЛОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ МЕРЕЖІ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ

Даний розділ присвячено гідравлічно-тепловому моделюванню, яке лягає в основу запропонованого підходу до пріоритетного регулювання теплових мереж. На відміну від аналітичного огляду Розділу 1, тут викладаються саме методичні аспекти – без апробації на конкретних мережах чи числових прикладів [93, 94]. Розділ описує узагальнене моделювання, що дозволяє окремо розраховувати гідравлічний режим теплової мережі та розподіл теплового навантаження між споживачами, інтегруючи обидва результати для реалізації алгоритму пріоритетного розподілу теплової енергії. Спочатку формулюються гідравлічні основи розрахунку (визначення втрат напору в мережі та сумарного гідравлічного опору траси до споживача), потім – математична модель теплового розподілу в умовах дефіциту теплопостачання, і насамкінець – алгоритм пріоритетного регулювання [95, 96]. Таким чином, у Розділі 2 викладено повний комплекс моделювання, який в подальших розділах буде застосований для аналізу роботи реальної системи та оцінки ефективності запропонованих рішень.

2.1 Моделювання гідравлічного розрахунку теплової мережі

Для забезпечення надійного теплопостачання кожного споживача необхідно, щоб гідравлічний опір трубопровідної траси від джерела тепла до цього споживача був компенсований наявним перепадом тиску.

Гідравлічна задача полягає в тому, щоб визначити повні втрати тиску на шляху від джерела до споживача за розрахункової витрати теплоносія [97]. Ця величина характеризує еквівалентний гідравлічний опір траси – сумарне падіння тиску, яке повинно бути забезпечене насосом для доставки теплоносія до даного споживача на необхідному рівні. На рис. 2.1 зображено типовий маршрут тепломережі «джерело – споживач», яка містить насосне обладнання на

Швидкість руху теплоносія визначається за формулою:

$$v = \frac{4G}{\pi d^2}, \text{ (м/с)}, \quad (2.1)$$

де G – об’ємна витрата теплоносія, (м³/год);
 d – внутрішній діаметр трубопроводу, (мм);

Питомі лінійні втрати напору можна обчислити за формулою:

$$r_{lin} = 0,11 * \left(\frac{k}{d}\right)^{0,25} * \frac{v^2}{2gd}, \left(\frac{\text{м вод. ст.}}{\text{м}}\right), \quad (2.2)$$

де k – еквівалентна шорсткість труби, (мм);
 v – швидкість руху теплоносія, (м/с);

Втрати напору на тертя на окремій ділянці довжиною (L) визначаються як:

$$R_{lin} = (L * r_{lin}) * 2, \text{ (м вод. ст.)}, \quad (2.3)$$

де L – довжина ділянки №20 теплової мережі, (м);

Місцеві втрати тиску на цій же ділянці розраховуються за формулою:

$$R_{loc} = \Sigma \xi_i * \frac{v^2}{2g}, \text{ (м вод. ст.)}, \quad (2.4)$$

де $\Sigma \xi_i$ – сума коефіцієнтів місцевих гідравлічних опорів ділянки;
 g – прискорення вільного падіння, (м²/с);

В Додатку Б наведено довідкову інформацію про величину коефіцієнта (ξ) в залежності від фізичного типу місцевого опору.

Для визначення величини сумарного опору теплової мережі від джерела до споживача послідовно розраховуються гідравлічні опори всіх ділянок трубопроводу. Сума послідовності ділянок визначає загальний опір мережі від джерела до споживача, згідно топографії для приведеного споживача загальний опір мережі становить:

$$R_{20} = R_{lin} + R_{loc} + R_{12}, \text{ (м вод. ст.)}, \quad (2.5)$$

де R_{20} – опір прикінцевої ділянки споживача, (м вод. ст.);

R_{12} – опір попередньої ділянки споживача, (м вод. ст.);

Отримане значення повної втрати напору характеризує динамічний тиск, який повинен розвинути циркуляційний насос на джерелі тепла для забезпечення розрахункової витрати (Q) до даної точки мережі. Зазначимо, що найбільші втрати тиску не обов'язково припадають на найдовший трубопровід: маршрут меншої довжини, але з меншим діаметром або більшим протоком теплоносія, може мати більший опір. Тому визначення «найважчого» споживача з точки зору забезпечення напором вимагає повноцінного розрахунку втрат, а не лише аналізу геометрії мережі. Розрахована величина втрат тиску на трасі та показана в Додатку В.

Для автоматичного визначення об'єкту, який має найбільший динамічний опір теплової мережі водиться індикатор - ($i_{max}^{(R)}$). В результаті найважчий споживач:

$$i_{max}^{(R)} = \max(R_i), \text{ (м вод. ст.)}, \quad (2.6)$$

Згідно розрахункової таблиці циркуляційний насос в ЦТП повинен забезпечити напір для ділянки №20, яка має найбільший динамічний опір. Таким чином можна визначити мінімальний напір насоса в ЦТП:

$$H_{circ} = (R_{20} + R_{cons} + R_{CHS} + 5) * 1,10, \text{ (м вод. ст.)}, \quad (2.7)$$

де R_{cons} – опір системи опалення споживача, (м вод. ст.);

R_{CHS} – опір джерела (ЦТП), (м вод. ст.);

Окрім динамічних втрат, для коректної роботи системи треба врахувати статичний напір, необхідний для підняття теплоносія на висоту споживача. Ця складова не залежить від витрати і визначається різницею геодезичних відміток між джерелом та споживачем, а також висотою будівлі споживача. Мінімумально необхідний статичний напір, що має підтримуватися підживлювальним насосом (або системою підтримання тиску), можна оцінити за формулою:

$$H_{stat} = h_{geo} + h_{build} + h_{safe}, \text{ (м вод. ст.)}, \quad (2.8)$$

де h_{geo} – різниця геодезичної висоти між джерелом та споживачем, (м);

h_{build} – висота споживача, (м);

h_{safe} – експлуатаційний запас, для запобігання підсосів повітря та забезпечення стабільної циркуляції теплоносія(м);

В Додатку Г зведено інформацію про мінімумально необхідний статичний напір для кожного споживача ЦТП.

Для автоматичного визначення об'єкту, який має найбільшу потребу в статичному напорі, необхідно задіяти індикатор ($i_{max}^{(H)}$) для характеристики статичного напору. Найважчий споживач за статичним напором:

$$i_{max}^{(H)} = \max(H_{stat}), \text{ (м вод. ст.)}, \quad (2.9)$$

Проведений гідравлічний аналіз дозволяє визначити критичні умови для роботи мережі [98]. Зокрема, серед усіх маршрутів «джерело – споживач» існує один, який характеризується найбільшим сумарним опором (найбільшими динамічними втратами тиску). Цей споживач є гідравлічно найвимогливішим і визначає мінімально необхідний напір циркуляційного насоса. Аналогічно, визначається споживач з максимальною геодезичною висотою або поверховістю, який потребує найбільшого статичного напору і тим самим визначає мінімально допустимий тиск у системі. Виявлення цих «найважчих» споживачів має важливе значення для подальшого балансування: саме їхні вимоги лягають в основу налаштування насосного обладнання та регулюючих клапанів. Отримані значення гідравлічних параметрів будуть використані в наступних розділах дисертації.

2.2 Моделювання теплового розподілу

У міських системах теплопостачання розподіл теплової енергії між споживачами за умов обмеженого ресурсу повинен здійснюватися за формалізованими математичними правилами [99]. Для цього вводиться модель, яка дозволяє визначити індивідуальний коефіцієнт постачання тепла для кожного споживача та забезпечити виконання вимог пріоритетності, мінімальних нормативних рівнів та сценаріїв дефіциту. Вихід моделі – величина фактичної теплової подачі, що буде реалізована автоматизованою системою управління.

Для застосування пріоритетного регулювання усіх споживачів поділяють на п'ять класів (А–Е) відповідно до їх соціальної та функціональної значущості. Така класифікація забезпечує керований та справедливий розподіл теплових ресурсів у дефіцитних режимах, насамперед гарантуючи забезпечення критичної інфраструктури [100]. Відповідно:

Клас А – критична інфраструктура. Лікарні, дитячі садки, пологові будинки, об'єкти безперервного медичного та соціального забезпечення.

Клас В – соціально важливі та адміністративні об'єкти. Заклади освіти, адміністративні установи, інфраструктура безпеки.

Клас С – житловий фонд. Багатоквартирні будинки різної поверховості.

Клас D – комерційні та офісні будівлі.

Клас E – промислові та виробничі об'єкти.

Присвоєння класу виконується вручну та погоджується на адміністративному рівні міста з урахуванням функціонального призначення будівлі. Кожен клас має індивідуальний сценарій обмеження теплової подачі при розрахунковому дефіциті газу, опорні значення наведені в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4

Коефіцієнти обмеження тепlopостачання для класів А – E залежно від сценарію дефіциту

Клас	0%	10%	20%	30%
A (медицина, ДНЗ, школи)	1,00	1,00	0,95	0,90
B (ВНЗ, адмін. критичні)	1,00	0,95	0,90	0,80
C (житловий фонд)	1,00	0,90	0,80	0,65
D (офіси, комерція)	1,00	0,80	0,65	0,50
E (промисловість)	1,00	0,70	0,50	0,30

Щоб дотриматися коректної роботи алгоритму для кожного класу вводяться мінімальні коефіцієнти обмеження, які наведені в таблиці 2.5:

Таблиця 2.5

Коефіцієнти мінімального обмеження тепlopостачання для класів А – E

Клас	K_{min}
A	0,70
B	0,60
C	0,50
D	0,40
E	0,30

Для демонстрації роботи моделі в Додатку Д наведено розрахункові дані для теплової мережі від ЦТП.

Для кожного (i) споживача задаються:

- проєктне теплове навантаження (Q_{design});
- клас пріоритетності (А...Е), який визначає соціальну значущість;
- коефіцієнт дефіциту для відповідного сценарію (K_{def});
- мінімально допустимий рівень забезпечення теплом (K_{min}).

2.2.1 Інтегральний показник пріоритетності

Первинний пріоритет споживача визначається як:

$$S_i = W_{class(i)} \quad (2.10)$$

де $W_{class(i)}$ – коефіцієнт обмеження тепlopостачання;

Він відображає соціальну важливість об'єкта та слугує базою для подальшої корекції коефіцієнтів.

2.2.2 Модератор теплового навантаження

У ситуації дефіциту теплової енергії великі споживачі можуть непропорційно витіснити менші. Щоб уникнути такого домінування, вводиться модератор теплового навантаження, який обчислюється за формулою:

$$L_i = \left(\frac{Q_{ref}}{Q_{ref} + Q_i} \right)^\gamma, \quad (2.11)$$

де Q_i – теплове навантаження споживача, (кВт);

Q_{ref} – опорне навантаження (середнє значення групи), (кВт);

γ – параметр чутливості, що враховує розкид теплових навантажень.

Параметр чутливості:

$$\gamma = \frac{\sigma(Q)}{\mu(Q)}, \quad (2.12)$$

де $\sigma(Q)$ – стандартне відхилення теплових навантажень, (кВт);
 $\mu(Q)$ – середнє арифметичне теплових навантажень, (кВт);

Середнє арифметичне теплове навантаження:

$$\mu(Q) = \frac{1}{n} * \Sigma Q_i, \text{ (кВт)}, \quad (2.13)$$

де n – кількість споживачів в групі;

Стандартне відхилення теплових навантажень:

$$\sigma(Q) = \sqrt{\frac{1}{n} * \Sigma (Q_i - \mu(Q))^2}, \text{ (кВт)}, \quad (2.14)$$

Коригований пріоритет:

$$S_i^{\wedge} = S_i * L_i \quad (2.15)$$

Таким чином, при дефіциті модель автоматично «підсилює» невеликі об'єкти та обмежує надмірне домінування великих.

2.2.3 Нормалізація пріоритетів

Для забезпечення порівнянності значень скоригованих пріоритетів застосовується нормалізація за формулою:

$$N_i = \frac{S'_i}{\max(S'_i)}, \quad (2.16)$$

Отримане значення варіюється від 0 до 1 і визначає відносну важливість кожного споживача без урахування сценарію дефіциту.

2.2.4 Базовий коефіцієнт теплопостачання

З урахуванням нормалізованого пріоритету вводиться базовий коефіцієнт теплопостачання (K_{raw}), що визначає початковий рівень забезпечення теплом за заданим сценарієм дефіциту:

$$K_{raw,i} = \max(K_{def,i} * N_i; K_{min,i}), \quad (2.17)$$

де K_{min} – коефіцієнт мінімального теплозабезпечення;

У розробленій методиці [101] мінімальна величина (K_{min}) вводиться не як результат теплотехнічного розрахунку, а як захисний параметр розрахункової моделі, що забезпечує її стійкість і коректність у режимах дефіциту теплоти. Його призначення полягає у недопущенні повного припинення теплопостачання окремих класів споживачів у процесі пріоритетного розподілу теплопостачання, що могло б призвести до неприйнятних з експлуатаційної точки зору рішень. Таким чином, мінімальний коефіцієнт обмеження виконує функцію нижньої межі, яка гарантує збереження працездатності алгоритму та забезпечує мінімально допустимий рівень теплопостачання для кожної групи споживачів незалежно від глибини дефіциту.

2.2.5 Масштабування теплового балансу

Оскільки сума теплових навантажень, отриманих на основі (K_{raw}), зазвичай не збігається із загальною потужністю доступного тепла, вводиться

процедура масштабування. Сумарна теплота за проміжними значеннями розраховується:

$$Q_{sum} = \Sigma(K_{raw,i} * Q_{design,i}), \text{ (кВт)}, \quad (2.18)$$

а цільова величина тепlopостачання для обраного сценарію дефіциту задається як:

$$Q_{target} = (1 - Def) * \Sigma Q_{design}, \text{ (кВт)}, \quad (2.19)$$

Тоді масштабуючий коефіцієнт (K_{scale}) обчислюється за формулою:

$$K_{scale} = \frac{Q_{target} - Q_{sum}}{\Sigma(1 - K_{raw,i})Q_{design,i}}, \quad (2.20)$$

Таким чином фінальний коефіцієнт тепlopостачання для i -го споживача становить:

$$K_{final,i} = K_{raw,i} + K_{scale}(1 - K_{raw,i}), \quad (2.21)$$

Цей підхід забезпечує:

- точне виконання сценарію дефіциту;
- збереження відносних пропорцій між споживачами;
- запобігання перевищенню номінальної теплової потужності.

2.2.6 Фактична теплова подача

Результатом роботи моделі є визначення реального теплового потоку (Q_{deliv}) для кожного споживача за формулою:

$$Q_{deliv,i} = K_{final,i} * Q_{design,i}, \text{ (кВт)}, \quad (2.22)$$

Ця величина використовується як командний сигнал для регулюючих клапанів або як контрольний параметр в автоматизованих системах теплового розподілу.

У результаті підрозділ формує завершену математичну модель теплового розподілу, яка дозволяє:

- формувати індивідуальні теплові подачі для всіх споживачів;
- враховувати сценарії дефіциту, вагові коефіцієнти класів та мінімальні потреби;
- забезпечувати коректний баланс тепла при будь-якому рівні доступного ресурсу.

Для узагальнення розробленого алгоритму та наочного представлення послідовності його реалізації на рисунку 2.5 наведено блок-схему алгоритму гідравлічно-теплового моделювання та пріоритетного розподілу теплопостачання.

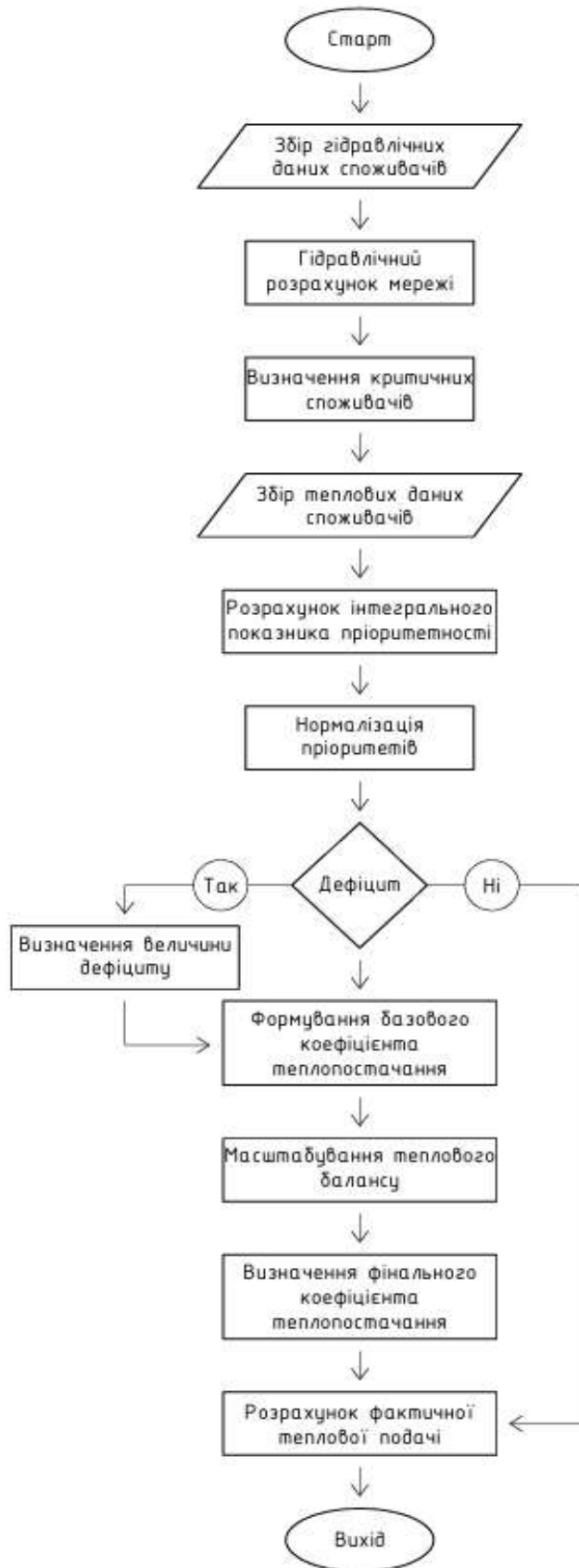


Рисунок 2.2 – Блок-схема алгоритму гідравлічно-теплого моделювання та пріоритетного розподілу теплопостачання

Підсумовуючи результати моделювання, наведено графічні зображення розподілу теплової енергії за трьома сценаріями дефіциту (10 %, 20 % та 30 %). На рисунках 2.2–2.4 відображено результати роботи моделі, які описують обсяги теплопостачання кожному споживачу групи відповідно до встановлених пріоритетів. Для наочного порівняння на графіках наведено проєктне забезпечення теплом споживачів. Перенесення числових даних у графічну форму дозволяє наочно побачити, як змінюється розподіл теплових ресурсів при різних рівнях дефіциту.

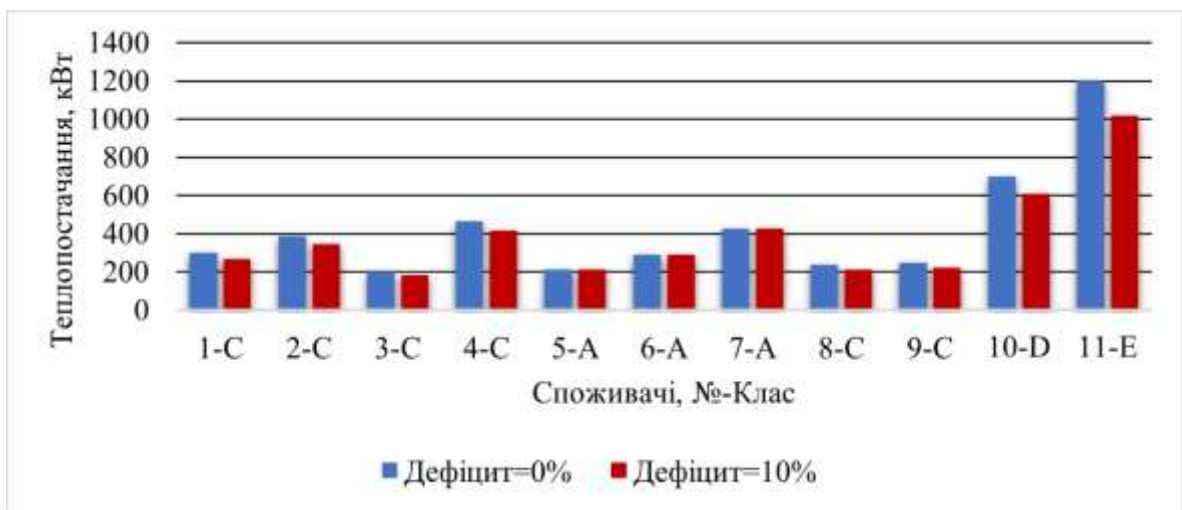


Рисунок 2.3 – Розподіл теплопостачання при дефіциті 10%

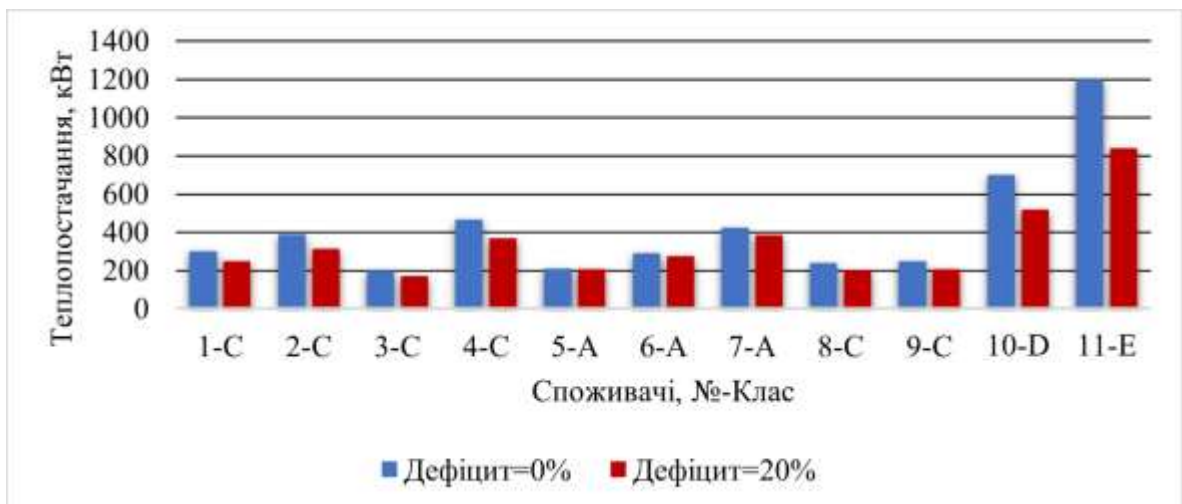


Рисунок 2.4 – Розподіл теплопостачання при дефіциті 20%

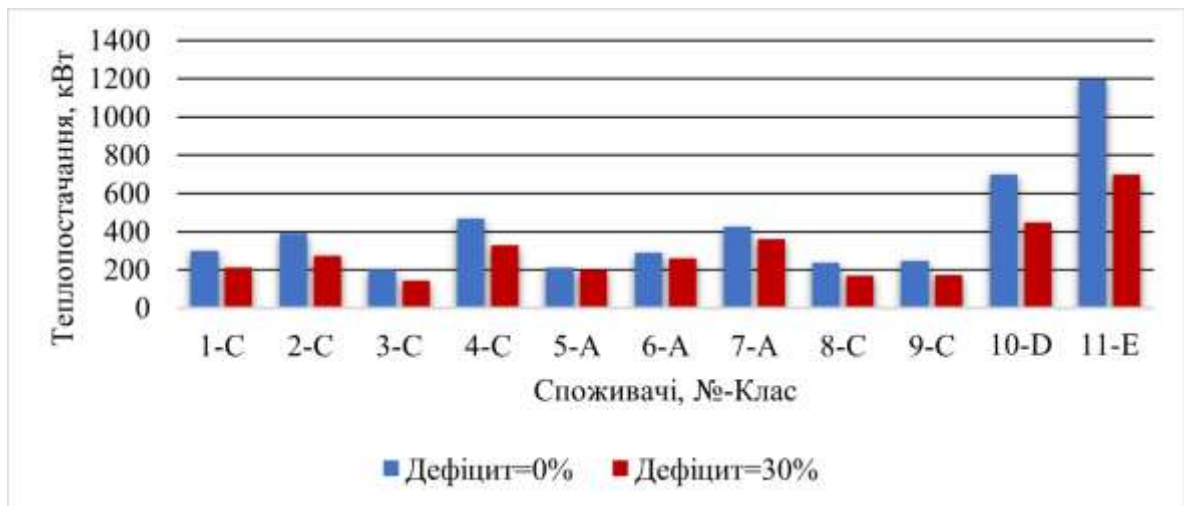


Рисунок 2.5 – Розподіл теплопостачання при дефіциті 30%

Висновки до розділу

У розділі розроблено та систематизовано алгоритм гідравлічно-теплого моделювання системи централізованого теплопостачання, який формує методичну основу для реалізації пріоритетного регулювання в умовах дефіциту теплової потужності. Побудована модель поєднує гідравлічний аналіз мережі з формалізованим тепловим розподілом і орієнтована на практичне застосування в міських тепломережах.

Основні результати розділу полягають у наступному:

1. Сформовано поетапний алгоритм розрахунку, що охоплює збір вихідних даних, визначення гідравлічних параметрів, оцінку еквівалентних опорів та подальший тепловий розподіл у єдиній структурі моделі.
2. Реалізовано узагальнений підхід до визначення еквівалентного опору траси «джерело – споживач» з урахуванням лінійних і місцевих втрат тиску, що дозволяє виявити критичні ділянки та об'єкти з підвищеними вимогами до перепаду тиску.
3. Побудовано тепловий блок моделі, який формалізує розподіл обмеженого ресурсу між споживачами з урахуванням їх класу, проектного навантаження та мінімально допустимих меж теплозабезпечення.

4. Запроваджено модератор навантаження та процедуру нормалізації коефіцієнтів, що забезпечують вирівнювання дисбалансів між великими та малими споживачами і запобігають витісненню соціально значущих об'єктів.
5. Аналітично підтверджено масштабованість алгоритму, що дозволяє адаптувати тепловий баланс до різних сценаріїв дефіциту без порушення гідравлічної стійкості мережі.
6. Показано придатність розробленої моделі до інтеграції в автоматизовані системи управління та її практичну застосовність для аналізу реальних міських тепломереж.

Таким чином, у розділі сформовано комплексну гідравлічно-теплову модель, що забезпечує технічну стабільність мережі та створює підґрунтя для реалізації алгоритмів пріоритетного регулювання, розгляд яких продовжено в наступних розділах дисертації.

3 ДОСЛІДЖЕННЯ КОМБІНОВАНОГО КЛАПАНА В ТЕПЛО- ВІЙ МЕРЕЖІ

Реалізація запропонованого в другому розділі алгоритму на практиці неможлива без конкретних технічних засобів, здатних забезпечити керований вплив на витрату теплоносія на рівні окремих споживачів. Таким засобом у системах тепlopостачання виступає регулювальна арматура, яка фактично є виконавчою ланкою між розрахунковою методикою та реальним гідравлічним режимом мережі. Саме через клапани відбувається фізичне втілення розрахункових коефіцієнтів, обмежень і сценаріїв, закладених у алгоритмі пріоритетного регулювання.

У цьому контексті особливий інтерес становлять комбіновані регулювальні клапани, що поєднують функції стабілізації перепаду тиску та обмеження витрати теплоносія. Теоретично такі пристрої створюють передумови для реалізації тиско-незалежного регулювання, що є принципово важливим для коректної роботи алгоритмів розподілу теплової потужності. Однак фактична працездатність клапанів значною мірою визначається реальними гідравлічними умовами мережі, величинами перепадів тиску та рівнем теплових навантажень споживачів.

З огляду на це, даний розділ присвячено дослідженню роботи комбінованого регулювального клапана як ключового елемента, через який алгоритм пріоритетного регулювання набуває практичного змісту. Розділ виконує роль логічного переходу від алгоритму та розрахункових залежностей до конкретного технічного об'єкта, поведінка якого безпосередньо визначає можливість та межі впровадження запропонованого підходу в реальних умовах теплової мережі.

3.1 Конструкція та принцип дії комбінованого клапана

Комбінований регулювальний клапан [102, 103] AFQMP 2 призначений для одночасного виконання двох функцій: стабілізації перепаду тиску та

регулювання витрати теплоносія у вузлах приєднання споживачів до теплової мережі.

Конструкція:

1. Корпус клапана
2. Вставка регулювальної частини клапана
3. Сальник клапана
4. Гайка обмеження макс. витрати
5. Сідло клапана
6. Вставка регулювального елемента
7. Регулювальний елемент
8. Мембрана регулювального елемента
9. Пружина регулювального елемента
10. Запобіжний клапан надлишкового тиску мембрани
11. Конус регулювання витрати (CV)
12. Конус регулювання тиску (DP)
13. Імпульсні трубки
14. Накідна гайка
15. Кришка клапана
16. Підключення до електропривода
17. Сальник клапана
18. Шкала налаштування
19. Індикатор налаштування
20. Гайка налаштування перепаду тиску

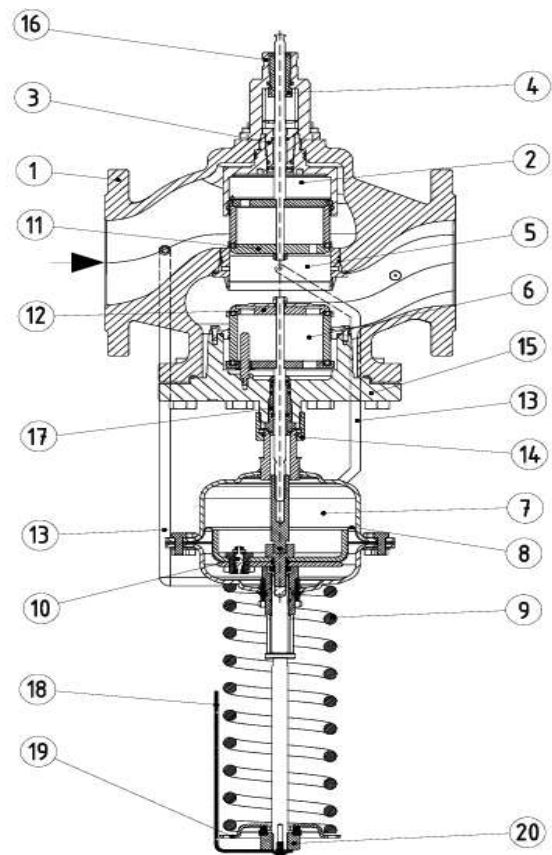


Рисунок 3.1 – Розріз комбінованого клапана AFQMP 2

Конструктивно клапан поєднує в одному корпусі регулювальний сідельний клапан та мембранний регулятор перепаду тиску, що забезпечує незалежну від тиску характеристику витрати у межах заданого робочого діапазону.

Основними елементами AFQMP 2 є регулювальний конус із сідлом, шток із механізмом обмеження ходу, мембранний блок регулятора перепаду тиску та система імпульсних трубок, що передають тиск із подаючого та зворотного трубопроводів. Мембрана регулятора сприймає різницю тисків між входом і виходом клапана та, у поєднанні з налаштованою пружиною, автоматично змінює положення штока, підтримуючи сталий перепад тиску на регулювальному органі.

Принцип дії клапана ґрунтується на розділенні функцій керування. Мембранний регулятор забезпечує стабілізацію перепаду тиску на

регулювальному конусі (Δp_{CV}), тоді як обмеження максимальної витрати здійснюється механічно за допомогою налаштування кількості обертів штока. За наявності достатнього вхідного перепаду тиску клапан переходить у режим регулювання, при якому витрата визначається лише положенням регулювального органу і не залежить від коливань тиску в мережі.

Виробником передбачено застосування клапана переважно у вузлах із відносно великими витратами теплоносія та стабільними гідравлічними умовами. Типовий діапазон номінальних діаметрів починається з DN65, а паспортні значення пропускної здатності (K_{vs}) орієнтовані на значні витрати, характерні для магістральних або групових приєднань.

Таким чином, конструкція клапана передбачає коректну роботу лише за умови виконання певних гідравлічних передумов, зокрема забезпечення мінімально необхідного перепаду тиску на регулювальному органі. Порухення цих умов призводить до виходу клапана з режиму стабілізації та втрати властивостей регулювання, що не залежить від тиску.

3.2 Діапазони перепаду тиску та умови стабільної роботи клапана

Ключовим параметром, що визначає працездатність комбінованого клапана, є перепад тиску на регулювальному конусі (Δp_{CV}). Саме цей перепад сприймається мембранним регулятором і використовується для формування керуючої дії на шток клапана. Відповідно до технічної документації виробника, стабільна робота мембранного регулятора забезпечується у межах діапазону ($\Delta p_{CV} = 0,1 - 1,0$ бар) залежно від типу пружини.

За значень (Δp_{CV}) нижчих за мінімальне порогове значення (1,0 бар) мембрана регулятора не входить у робочу зону, а отже, не здатна підтримувати заданий перепад тиску. У такому режимі клапан втрачає властивість автоматичної стабілізації і фактично працює як звичайний дросельний елемент із фіксованим положенням регулювального органу.

У реальних умовах роботи локальних теплових вузлів величина (Δp_{CV}) не задається безпосередньо, а формується як частина загального вхідного перепаду тиску (Δp_{in}), який розподіляється між гідравлічним опором споживача та регулювальним клапаном. Для систем із малими витратами теплоносія характерним є те, що більша частина доступного перепаду витрачається на подолання опорів внутрішніх систем опалення, тоді як на регулювальному органі залишається лише незначна частка.

Особливо критично ця ситуація проявляється для споживачів із невеликими тепловими навантаженнями, де проєктні витрати знаходяться у діапазоні кількох кубічних метрів на годину [104]. За таких умов навіть при зростанні загального вхідного перепаду тиску фактичний перепад на регулювальному конусі залишається меншим за мінімально допустиме значення для роботи мембрани. У результаті клапан не переходить у режим незалежного від тиску регулювання, а його поведінка визначається виключно механічними обмеженнями ходу штока та гідравлікою мережі.

Таким чином, діапазон ($\Delta p_{CV} = 0,1 - 1,0$ бар) є не просто рекомендацією, а необхідною умовою коректної роботи клапана. У разі його недотримання регулювальний вузол втрачає функціональні переваги комбінованого рішення. Це створює передумови для виникнення нестабільних режимів регулювання витрати, особливо в умовах малих навантажень та обмежених перепадів тиску, характерних для локальних теплових вузлів центральних теплових пунктів.

Саме аналіз відповідності фактичних режимів роботи клапана вимогам щодо (Δp_{CV}) є визначальним для оцінки доцільності його застосування в конкретних умовах теплової мережі.

3.3 Моделювання витрати теплоносія через клапан при змінному перепаді тиску

Для оцінки працездатності комбінованого регулювального клапана AFQMP 2 у реальних умовах експлуатації необхідно розглянути взаємозв'язок між витратою теплоносія та перепадом тиску на регулювальному органі. На відміну від ідеалізованого режиму тиско-незалежного регулювання, у якому витрата визначається виключно положенням клапана, у реальних теплових мережах цей режим досягається лише за виконання умов щодо мінімального перепаду тиску (Δp_{CV}).

Базовою залежністю для опису витрати через регулювальний клапан є стандартне гідравлічне співвідношення:

$$G = K_v \sqrt{\Delta p} \quad (3.1)$$

де K_v — пропускна здатність клапана, м³/год;

Δp — перепад тиску на регулювальному органі, бар;

У випадку комбінованого клапана величина (K_v) обмежується налаштуванням максимального ходу штока і залежить від обраного номінального діаметра та конструктивного значення (K_{vs}). За повністю відкритого клапана витрата визначається максимальною пропускною здатністю:

$$G_{max} = K_{vs} \sqrt{\Delta p_{CV}}, \quad (3.2)$$

Однак у реальних умовах роботи локального теплового вузла перепад тиску на регулювальному органі (Δp_{CV}) є лише частиною загального вхідного перепаду тиску (Δp_{in}), який розподіляється між внутрішніми гідравлічними опорами споживача та клапаном:

$$\Delta p_{in} = \Delta p_{cons} + \Delta p_{CV} \quad (3.3)$$

де Δp_{cons} — гідравлічний опір внутрішньої системи споживача, бар;

За малих витрат теплоносія величина (Δp_{cons}) зростає повільніше, ніж зменшується доступний перепад для клапана, у результаті чого (Δp_{CV}) може не досягати мінімального значення, необхідного для роботи мембранного регулятора. У цьому випадку клапан переходить у режим залежного від тиску дроселювання, а витрата визначається фактичним перепадом тиску:

$$G_{fact} = \Delta K_v \sqrt{\Delta p_{CV, fact}} \quad (3.4)$$

де $\Delta p_{CV, fact} < \Delta p_{CV, min}$.

Для формалізації цього ефекту доцільно розділити два режими роботи клапана:

1. Режим стабілізації перепаду тиску

$$\Delta p_{CV} \geq \Delta p_{CV, min} \rightarrow G \approx const \quad (3.5)$$

2. Режим нестабілізованого регулювання

$$\Delta p_{CV} < \Delta p_{CV, min} \rightarrow G = f(\Delta p_{in}) \quad (3.6)$$

У другому режимі витрата стає чутливою до коливань тиску в мережі, що суперечить основній ідеї комбінованого клапана. Особливо це характерно для споживачів із малими розрахунковими навантаженнями, де проєктні витрати знаходяться значно нижче номінального діапазону застосування клапана.

Таким чином, математичне моделювання показує, що працездатність клапана визначається не лише його конструктивними параметрами, але й співвідношенням між фактичним перепадом тиску та проектною витратою. За відсутності достатнього перепаду тиску клапан не здатен реалізувати режим тиско-незалежного регулювання, а фактична витрата відхиляється від розрахункової, що створює передумови для нестабільної роботи локального теплового вузла.

Отримані залежності є основою для подальшого аналізу поведінки клапана при малих витратах теплоносія та дозволяють перейти до кількісного дослідження впливу зниженого перепаду тиску на стабільність регулювання [105].

На рисунку 3.2 показано характерну залежність фактичної витрати теплоносія від вхідного перепаду тиску, що ілюструє відхилення роботи клапана від режиму тиско-незалежного регулювання.

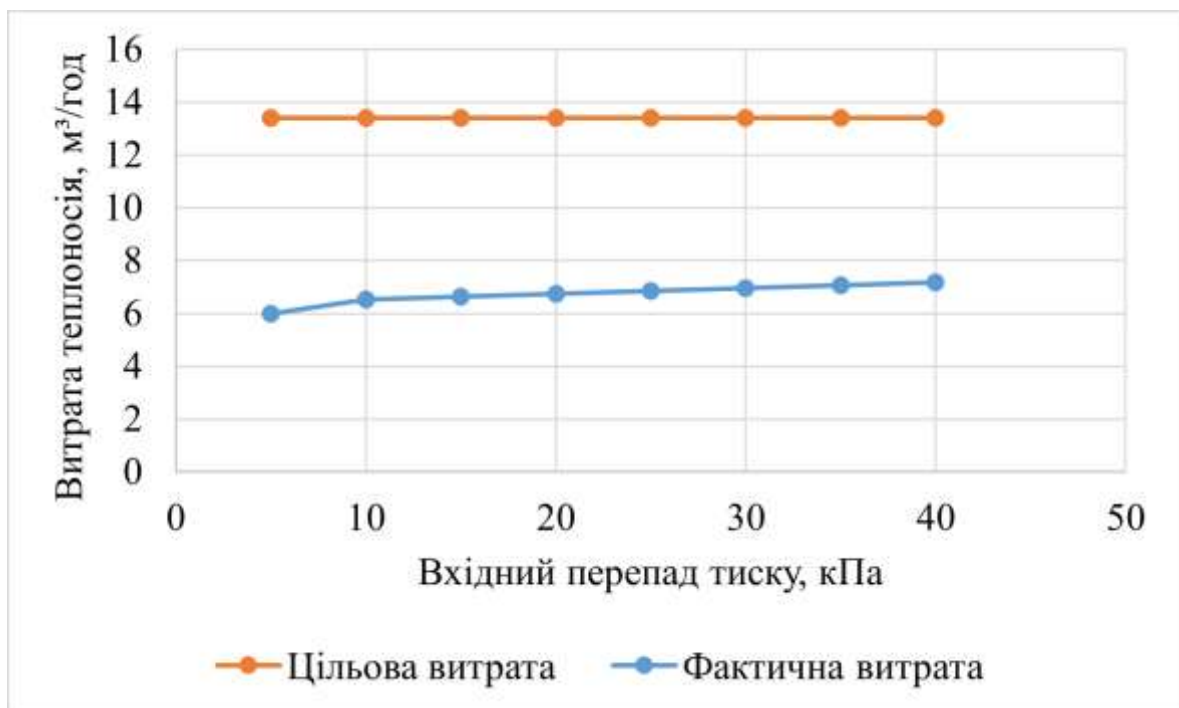


Рисунок 3.2 – Порівняння цільової та фактичної витрати теплоносія при змінному Δp_{in}

Важливо підкреслити, що описаний ефект не є наслідком неправильної настройки клапана чи помилки моделювання. Він має системний характер і обумовлений поєднанням двох факторів: малих проєктних витрат теплоносія та конструктивних особливостей клапана, розрахованого на роботу в умовах вищих витрат і стабільніших перепадів тиску.

3.4 Аналіз роботи комбінованого клапана в умовах низьких витрат

Результати математичного моделювання та їх графічна інтерпретація дозволяють виконати узагальнений аналіз роботи комбінованого клапана у режимах, що відрізняються від номінальних умов експлуатації. Особливу увагу приділено області малих витрат теплоносія, характерній для локальних теплових вузлів із невеликим тепловим навантаженням.

Як показано на рисунку 3.1, при змінному вхідному перепаді тиску (Δp_{in}) розрахункова витрата (G_{target}) залишається практично сталою, що відповідає ідеалізованому режиму тиско-незалежного регулювання. Водночас фактична витрата (G_{fact}) зростає разом зі збільшенням (Δp_{in}), що свідчить про відсутність стабілізації перепаду тиску на регульовальному органі клапана.

Фізично така поведінка пояснюється тим, що за малих проєктних витрат більша частина доступного перепаду тиску витрачається на гідравлічні опори внутрішньої системи споживача. У результаті перепад тиску на регульовальному конусі клапана (Δp_{CV}) не досягає мінімального значення, необхідного для входження мембранного регулятора в робочу зону. За цих умов клапан не переходить у режим стабілізації перепаду тиску, а його робота визначається співвідношенням між фактичним перепадом тиску та пропускнуою здатністю регульовального органу.

Важливу роль у формуванні такого режиму відіграє значення пропускнуої здатності (K_{vS}), яке для клапанів AFQMP 2 відповідає відносно великим витратам теплоносія. За малих навантажень використання клапана з великим (K_{vS}) призводить до того, що для пропускання заданої витрати необхідний

дуже малий перепад тиску. Унаслідок цього мембранний регулятор перепаду тиску фактично не задіяний у процесі керування, а клапан працює в області низької керованості.

У такому режимі навіть незначні коливання тиску в тепловій мережі спричиняють помітні зміни витрати теплоносія через клапан. Це означає втрату тиско-незалежного характеру регулювання та підвищену чутливість локального теплового вузла до режимів роботи мережевих насосів і суміжних споживачів. Практичним наслідком є ускладнення процесу налагодження та нестабільність гідравлічного режиму, особливо в перехідні періоди роботи системи.

Таким чином, область малих витрат теплоносія може бути визначена як критична зона застосування клапана AFQMP 2. У цій зоні не реалізується режим тиско-незалежного регулювання, а фактична витрата істотно залежить від гідравлічних умов теплової мережі. Отримані результати створюють основу для порівняльного аналізу комбінованого клапана з альтернативними схемами регулювання, у яких функції стабілізації перепаду тиску та регулювання витрати реалізуються окремими елементами.

3.5 Порівняння клапанів модульного та комбінованого типу

Для аналізу ефективності різних схем регулювання витрати теплоносія в локальних теплових вузлах доцільно порівняти комбінований клапан AFQMP 2 із рішенням на базі регулятора перепаду тиску AFP 2 [106] у поєднанні з окремим регулювальним клапаном FVG 2 [107]. Обидві схеми призначені для стабілізації гідравлічних режимів, однак реалізують цю функцію різними принципами.

Клапан AFQMP 2 поєднує в одному корпусі стабілізацію перепаду тиску та обмеження витрати. Така архітектура є ефективною за умов достатніх перепадів тиску та відносно великих витрат теплоносія, коли мембранний

регулятор працює в межах номінального діапазону. У цих умовах забезпечується компактність вузла та спрощення монтажу.

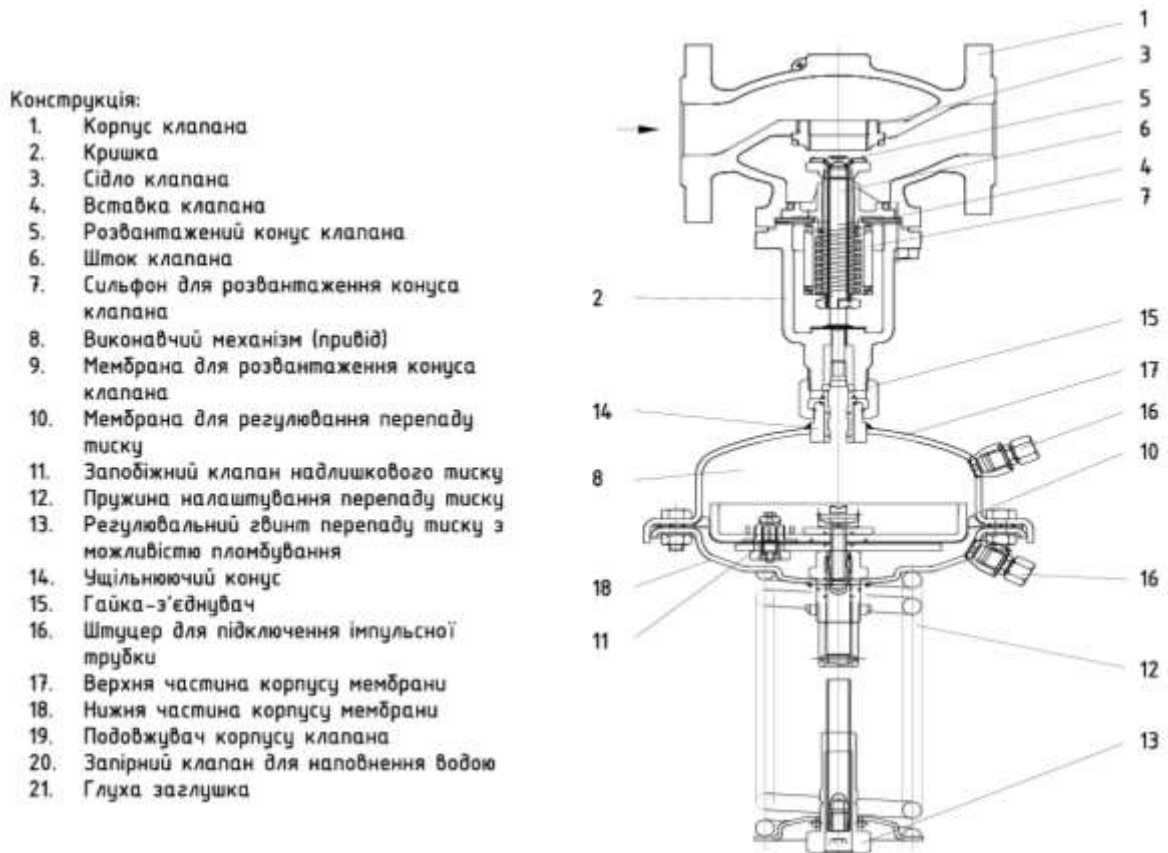


Рисунок 3.3 – Розріз клапана VFG 2 із мембраною AFP 2

Схема з AFP 2 передбачає функціональне розділення: регулятор перепаду тиску підтримує сталий (Δp), а регулювальний клапан працює в умовах гарантованого перепаду. Це дозволяє більш гнучко підбирати параметри регулювання відповідно до фактичних гідравлічних режимів споживача, зокрема при малих витратах теплоносія.

Як показано в попередніх підрозділах, при малих навантаженнях клапан AFQMP 2 може працювати поза зоною стабілізації через недостатній перепад тиску на регулювальному органі, що призводить до втрати тиско-незалежного характеру регулювання. У таких умовах схема з AFP 2 забезпечує більш стабільну роботу завдяки гарантованій стабілізації перепаду тиску [108].

Таким чином, вибір між AFQMP 2 та AFP 2 визначається реальними гідравлічними режимами роботи вузла. AFQMP 2 є доцільним для споживачів

із більшими витратами та стабільними перепадами тиску, тоді як схема з AFP 2 демонструє кращу керованість у локальних теплових вузлах із малими витратами теплоносія [109].

Висновки до розділу

У розділі виконано дослідження особливостей роботи комбінованого регулювального клапана AFQMP 2 у складі локальних теплових вузлів за відхилення реальних гідравлічних умов від номінальних. Аналіз базується на математичному моделюванні та графічній інтерпретації режимів роботи і спрямований на визначення меж коректного застосування тиско-незалежної регулювальної арматури в міських тепломережах.

Основні результати розділу:

1. Показано, що працездатність комбінованого клапана визначається не лише його конструктивними характеристиками, а передусім фактичним перепадом тиску на регулювальному органі та гідравлічними параметрами споживача.
2. Встановлено, що забезпечення мінімально необхідного перепаду тиску на клапані є ключовою умовою реалізації тиско-незалежного регулювання; за його відсутності мембранний регулятор не входить у робочу зону, а витрата теплоносія стає залежною від коливань тиску в мережі.
3. Доведено, що в області малих витрат теплоносія клапан AFQMP 2 працює поза режимом стабілізації перепаду тиску, що призводить до відхилення фактичної витрати від розрахункової та зниження стабільності роботи теплового вузла.
4. Порівняльний аналіз показав, що схема з функціональним розділенням стабілізації перепаду тиску та регулювання витрати (AFP 2 + FVG 2) забезпечує більш передбачуваний і стабільний режим для малих витрат теплоносія.

5. Обґрунтовано, що комбінований клапан AFQMP 2 є доцільним для застосування в умовах більших витрат.

Таким чином, у розділі визначено межі ефективного застосування комбінованих тиско-незалежних клапанів і сформовано методичну основу для обґрунтованого вибору типу регулювальної арматури з урахуванням реальних гідравлічних режимів споживача, що є необхідним етапом подальшої оптимізації теплових вузлів систем централізованого теплопостачання.

4 МОДЕЛЮВАННЯ МОДЕРНІЗОВАНИХ ЛОКАЛЬНИХ ТЕП- ЛОВИХ ВУЗЛІВ

Метою четвертого розділу є математичне обґрунтування заміни традиційних елеваторних вузлів на керовані ІТП та оцінка впливу такої заміни на гідравлічний режим і керованість системи в умовах дефіциту тепла [110]. Для цього моделюється робота елеватора як нерегульованого змішувального вузла, визначаються його режимні обмеження за перепадом тиску та витратою, після чого розглядається альтернативна схема ІТП на базі вузлів регулювання витрати/перепаду тиску (AFQMP 2 або комбінація AFP 2 + регулювальний клапан). На основі гідравлічних і теплових співвідношень порівнюються режими роботи при низькому/високому (Δp) та малих/великих витратах, перевіряються умови кавітаційної стійкості та оцінюється системний ефект для гілки мережі (зміна втрат напору, перерозподіл (Δp), вплив на насосний режим і енергоефективність) [111].

4.1 Моделювання елеваторного вузла

Елеваторний вузол є класичним елементом систем централізованого теплопостачання, що забезпечує зниження температури теплоносія, який надходить із теплової мережі, до рівня, допустимого для внутрішньо-будинкової системи опалення. Принцип роботи елеватора базується на використанні кінетичної енергії струменя мережної води, що витікає через сопло, для підсмоктування зворотної води зі зворотного трубопроводу споживача та подальшого змішування потоків у камері елеватора. На рисунку 4.1 проілюстровано принципovu схему елеваторного вузла.

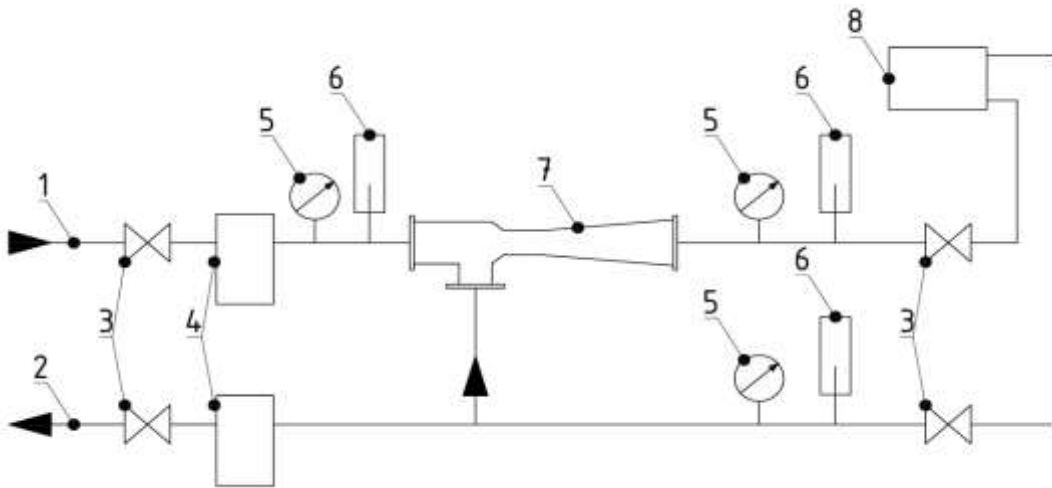


Рисунок 4.1 – Принципова схема елеваторного вузла. 1 – подаючий трубопровід; 2 – зворотний трубопровід; 3 – засувка; 4 – фільтр грубої очистки; 5 – манометр; 6 – термометр; 7 – елеватор; 8 – споживач

Робота елеватора визначається одночасною дією теплових і гідравлічних факторів, що робить неможливим його коректний опис без урахування балансу витрат і напорів.

Баланс витрат має вигляд:

$$G_3 = G_1 + G_2, \text{ (м}^3\text{/год)}, \quad (4.1)$$

де G_1 – витрата мережевого теплоносія через сопло елеватора, (м³/год);
 G_2 – витрата теплоносія, що підмішується зі зворотної лінії, (м³/год);
 G_3 – сумарна витрата, що надходить у систему опалення, (м³/год).

Для аналізу застосовується коефіцієнт підмішування:

$$u = \frac{G_2}{G_1}, \quad G_3 = (1 + u)G_1, \text{ (м}^3\text{/год)}, \quad (4.2)$$

Температура теплоносія після елеватора визначається з рівняння теплового балансу:

$$T_3 = \frac{T_1 + uT_2}{1 + u}, (\text{°C}), \quad (4.3)$$

- де T_1 – температура мережевої подачі, (°C);
 T_2 – температура зворотної лінії, (°C);
 T_3 – температура теплоносія після елеватора, (°C).

Реальна робота елеватора визначається доступним перепадом тиску між подаючим і зворотним трубопроводами теплової мережі:

$$\Delta H_{in} = H_s - H_r, (\text{м вод. ст.}), \quad (4.4)$$

Цей перепад витрачається на:

- Втрати на підвідних елементах до сопла;
- Перепад тиску на соплі елеватора;
- Втрати в системі опалення;
- Втрати після дифузора до зворотної лінії.

У загальному вигляді баланс напорів записується як:

$$\Delta H_{in} = \Delta H_s(G_1) + \Delta H_0 + \Delta H_{sys}(G_3) + \Delta H_d(G_3), (\text{м вод. ст.}), \quad (4.5)$$

- Де ΔH_0 – перепад тиску безпосередньо на соплі, (м вод. ст.);
 ΔH_{sys} – гідравлічний опір системи опалення, (м вод. ст.);
 $\Delta H_s, \Delta H_d$ – втрати до та після елеватора, (м вод. ст.).

Гідравлічний опір системи опалення описується квадратичною залежністю:

$$\Delta H_{sys} = R_{sys} G_3^2, (\text{м вод. ст.}), \quad (4.6)$$

де R_{sys} – опір системи опалення споживача, (м вод. ст.).

Перепад тиску на соплі пов'язаний з витратою мережевого теплоносія співвідношенням:

$$G_1 = \mu_0 A_0 \sqrt{2g\Delta H_0}, \text{ (м}^3\text{/год)}, \quad (4.7)$$

де μ_0 – коефіцієнт витрати сопла;

A_0 – площа сопла, (м²);

g – прискорення вільного падіння, (м/с²).

Підставляючи формули (4.2), (4.6), (4.7) у (4.5), отримуємо рівняння режиму елеватора, яке дозволяє визначити витрати при заданому доступному напорі.

У першому етапі розрахунків температура мережевої подачі (T_1), температура зворотної лінії (T_2) та необхідна температура після елеватора (T_3) вважаються заданими відповідно до температурного графіка системи опалення. Коефіцієнт підмішування визначається з формули (4.2).

Для кожного значення доступного перепаду (ΔH_{in}) розв'язується рівняння:

$$\Delta H_{in} = R_s G_1^2 + \frac{1}{2g} \left(\frac{G_1}{\mu_0 A_0} \right)^2 + (R_{sys} + R_d)(1 + u)^2 G_1^2, \text{ (м вод. ст.)}, \quad (4.8)$$

У результаті визначаються:

$$G_1, G_2 = uG_1, G_3 = (1 + u)G_1, \text{ (м}^3\text{/год)}, \quad (4.9)$$

Отримані значення дозволяють оцінити реальну теплову потужність споживача:

$$Q = c\rho G_3(T_3 - T_2), \text{ (кВт)}, \quad (4.10)$$

де c – питома теплоємність води, (кДж/(кг * °С));

ρ – густина води, (кг/м³).

Таким чином, зменшення доступного напору призводить до зменшення витрати теплоносія і відповідно до зниження теплової потужності при незмінному температурному графіку.

У другому етапі розрахунків (ΔH_{in}) вважається сталим, тоді як температура мережевої подачі (T_1) змінюється. Для кожного (T_1) визначається необхідний коефіцієнт підмішування:

$$u(T_1) = \frac{T_1 + T_2}{T_3 - T_2}, \quad (4.11)$$

Далі розв'язується рівняння (4.8), що дозволяє визначити витрати та перевірити, чи може елеватор забезпечити задану температуру для споживача при наявному напорі.

На основі наведеної математичної моделі виконано серію розрахунків для характерного споживача за адресою «Данченка 3», обладнаного елеваторним вузлом, у діапазоні зміни доступного перепаду тиску на вводі. Вихідними даними для моделювання слугували геометричні параметри елеватора, розрахункові температури мережевої подачі та зворотної лінії відповідно до температурного графіка, а також гідравлічний опір системи опалення. Детальні результати розрахунків режимів роботи елеваторного вузла при змінному перепаді тиску наведено в Додатку Е.

Аналіз отриманих даних показав суттєву залежність режиму роботи елеваторного вузла від доступного напору на вводі споживача. У діапазоні напорів 5–15 м вод. ст. надлишок напору має від'ємне значення, що унеможливорює формування витрати теплоносія через сопло елеватора. За цих умов фактична

витрата в систему опалення дорівнює нулю, температура теплоносія після елеватора не визначається, а теплова потужність не передається споживачеві. Такий режим є непрацездатним і свідчить про принципову неможливість роботи елеваторного вузла при недостатньому перепаді тиску в тепловій мережі [112].

Починаючи з напору на вводі 20 м вод. ст., надлишок напору набуває додатних значень, що призводить до появи витрати теплоносія через сопло та початку процесу підмішування. Однак у цьому діапазоні режим роботи залишається граничним: фактична витрата теплоносія в систему опалення становить близько 3,7 м³/год, коефіцієнт підмішування дорівнює 0,44, а температура теплоносія після елеватора сягає 112 °С. При цьому фактична теплова потужність не перевищує 80 кВт, що відповідає приблизно 15 % від розрахункової потреби споживача, тобто нормативний рівень теплопостачання не забезпечується.

Подальше зростання напору призводить до поступового збільшення витрати теплоносія, зростання коефіцієнта підмішування та підвищення сумарної витрати в систему опалення. Одночасно температура теплоносія після елеватора зменшується, що відповідає зростанню частки підмішуваної зворотної води. У діапазоні напорів 25–30 м вод. ст. теплова потужність зростає до 230–420 кВт, а забезпеченість теплопостачання досягає 45–80 %, проте проєктні параметри ще не виконуються повністю, що характеризує режим як нестабільний і напів-працездатний.

Лише при напорах, близьких до 33–35 м вод. ст. і вище, елеваторний вузол наближається до номінального режиму роботи. За цих умов забезпечується розрахункова витрата теплоносія та досягнення проєктної теплової потужності, що можливе лише за наявності високого, практично номінального напору на вводі споживача.

Таким чином, результати моделювання підтверджують, що елеваторний вузол має вкрай вузький діапазон працездатності та жорстко прив'язаний до конкретного значення перепаду тиску в тепловій мережі [113]. Для наочного аналізу отриманих залежностей побудовано графіки зміни витрати теплоносія,

температури після елеватора та коефіцієнта підмішування від перепаду тиску на ввіді споживача, які дозволяють чітко виділити робочий, граничний і непрацездатний режими та слугують основою для подальшого порівняння з керованими схемами на базі індивідуальних теплових пунктів.

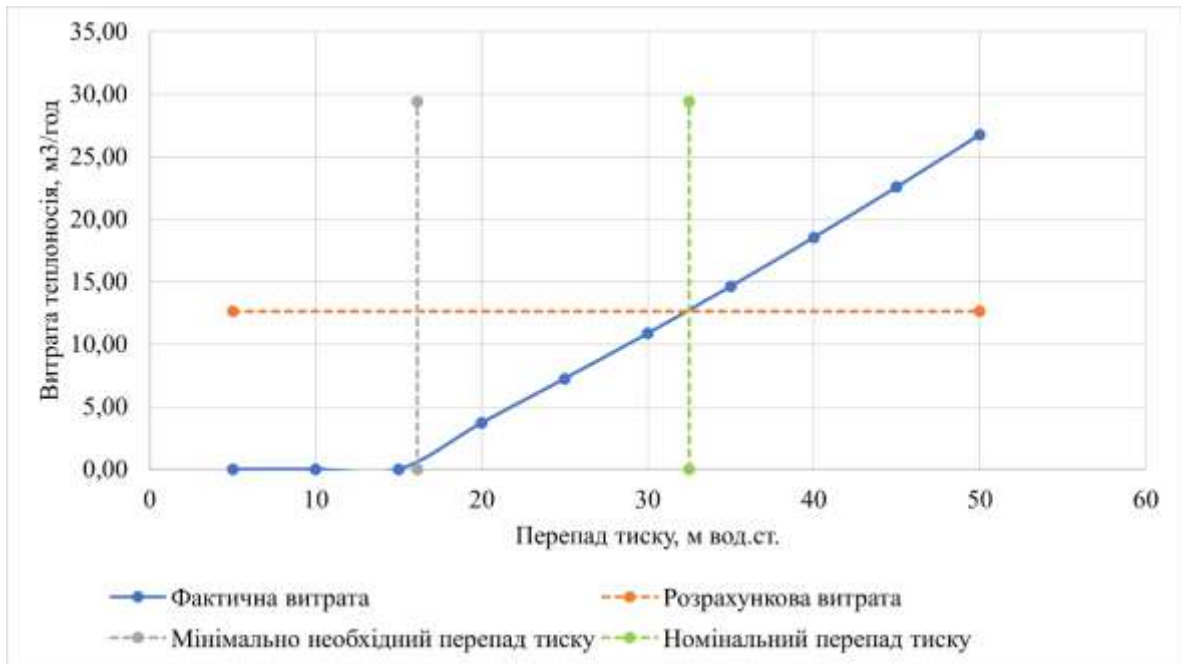


Рисунок 4.2 – Область працездатності елеваторного вузла за перепадом тиску.

На рисунку 4.2 показано залежність витрати теплоносія в систему опалення від перепаду тиску на ввіді споживача. Видно, що працездатність елеватора забезпечується лише при перевищенні мінімально необхідного напору, який становить 16,13 м вод. ст. Досягнення розрахункової витрати можливе лише за наявності номінального перепаду тиску на ввіді, що $\approx 32,5$ м вод. ст. У даному діапазоні елеватор працює в граничному режимі та не забезпечує нормативне тепlopостачання. Номінальний перепад тиску на ввіді, необхідний для забезпечення розрахункової витрати, співставний з р. т. насоса котельні = 33,21 м вод. ст. Це підтверджує жорстку залежність режиму роботи елеватора від доступного напору в тепловій мережі.

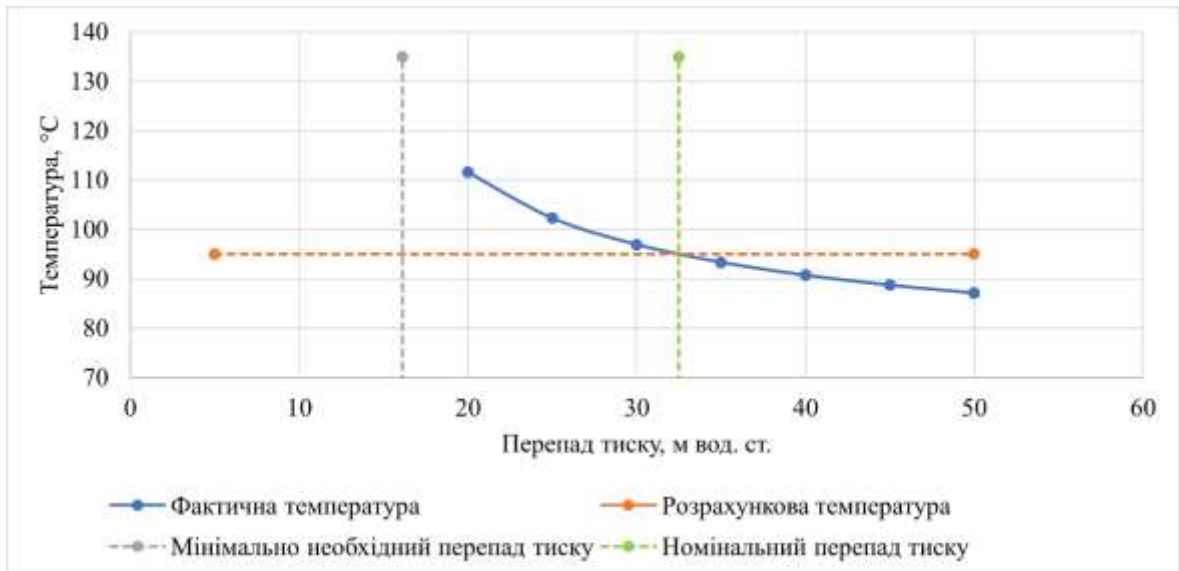


Рисунок 4.3 – Значення температурного графіка після елеваторного вузла при зміні перепаду тиску

На рисунку 4.3 показано зміну температури теплоносія після елеваторного вузла залежно від перепаду тиску на ввіді споживача. Видно, що забезпечення розрахункового температурного графіка можливе лише при номінальному перепаді тиску (32,5 м вод. ст.). При зміні перепаду тиску відносно номінального значення температура після елеватора відхиляється від розрахункової, що свідчить відсутність можливостей стабілізації режиму.

Коефіцієнт підмішування елеваторного вузла істотно залежить від перепаду тиску на ввіді. Номінальне значення (μ) забезпечується лише поблизу розрахункового режиму, тоді як при відхиленнях напору від номіналу (μ) змінюється, що призводить до порушення температурного графіка та нестабільності теплопостачання.

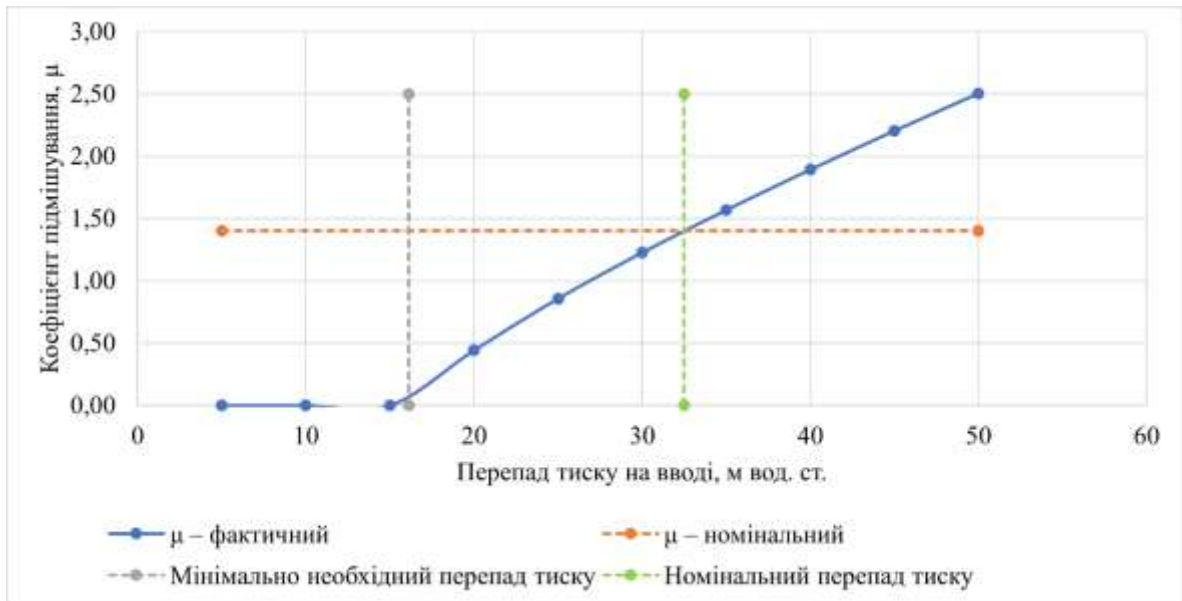


Рисунок 4.4 – Значення коефіцієнта підмішування елеваторного вузла при зміні перепаду тиску

На рисунку 4.4 видно, що коефіцієнт підмішування елеваторного вузла істотно залежить від перепаду тиску на вводі споживача і не має стабілізованого значення. Номінальний коефіцієнт підмішування забезпечується лише в одній робочій точці, що відповідає розрахунковому перепаду тиску. При відхиленні напору від номінального значення коефіцієнт підмішування змінюється, що призводить до порушення температурного та гідравлічного режимів системи опалення.

Отримані результати математичного моделювання однозначно підтверджують, що елеваторний вузол є гідравлічно та тепло-технічно жорстко прив'язаним до одного розрахункового значення перепаду тиску в тепловій мережі. Його стабільна робота можлива виключно в околі номінальної робочої точки, тоді як будь-яке відхилення напору від розрахункового значення призводить до порушення гідравлічного та температурного режимів і різкого зниження забезпеченості тепlopостачання. Зазначений факт є добре відомим з практики експлуатації систем тепlopостачання та відображений у чинних нормативних документах України, які не передбачають використання елеваторних вузлів як регульовальних або адаптивних елементів. У рамках даної роботи

цей відомий інженерний висновок отримав кількісне підтвердження шляхом математичного моделювання та чисельного аналізу, що додатково обґрунтовує неможливість застосування елеваторних вузлів у сучасних системах тепlopостачання з керованим і пріоритетним розподілом теплової енергії.

4.2 Вихідні дані споживача та формування принципової схеми ІТП

Для реалізації керованого тепlopостачання та подальшої інтеграції споживача в систему пріоритетного регулювання необхідно визначити сукупність вихідних даних, які формують граничні умови роботи ІТП. У даному дослідженні ІТП розглядається не як типовий заводський виріб, а як інженерно спроектований елемент теплової мережі, параметри якого безпосередньо залежать від характеристик конкретного споживача та умов його підключення до теплової мережі.

Вихідні дані споживача поділяються на теплові та гідравлічні. Теплові параметри визначають необхідний рівень тепlopостачання будівлі в розрахункових умовах і задають цільові значення теплової потужності, які мають бути забезпечені індивідуальним тепловим вузлом [114]. До таких параметрів належить розрахункове теплове навантаження споживача (Q_{design}), прийняте відповідно до проєктної документації, а також температурний графік теплової мережі (130/70 °C). Окремо визначається мінімально допустиме теплове навантаження, яке має підтримуватися за умов реалізації сценаріїв дефіциту теплової енергії [115].

Гідравлічні параметри характеризують умови подачі теплоносія до будівлі та визначають допустимі режими роботи регульовального обладнання. До них належить доступний та допустимий перепад тиску на вводі в будівлю, який обмежує можливість стабілізації витрати теплоносія локальним вузлом [116]. Визначається розрахункова витрата теплоносія, що відповідає проєктному тепловому навантаженню, а також мінімальна витрата, при якій забезпечується стійка робота системи опалення без втрати гідравлічної стабільності.

Додатково враховується гідравлічний опір внутрішньої системи опалення будівлі, який включає втрати тиску в стояках, опалювальних приладах і внутрішніх трубопроводах.

Сукупність наведених параметрів формує граничні умови, в межах яких здійснюється подальше моделювання роботи ІТП. Саме ці дані визначають можливість застосування керованих регулювальних елементів, вибір принципової схеми вузла, а також діапазони стабільної роботи обладнання за змінних режимів теплопостачання. Вихідні параметри споживача, прийнятого для подальшого моделювання, узагальнено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1

Вихідні теплові та гідравлічні дані споживача

№	Параметр	Позначення	Значення	Од. вим.
1	Розрахункове теплове навантаження	Q_{design}	368	кВт
2	Мінімально допустиме теплове навантаження	Q_{min}	256	кВт
3	Температурний графік теплової мережі	T_1/T_2	130/70	°С
4	Розрахункова витрата теплоносія	G_{design}	5,27	м ³ /год
5	Мінімальна витрата теплоносія	G_{min}	3,67	м ³ /год
6	Доступний перепад тиску на вводі	Δp_{in}	33,21	м вод.ст.
7	Мінімально необхідний перепад тиску	Δp_{min}	11	м вод.ст.
8	Гідравлічний опір внутр. системи опалення	R_{sys}	2,0	м вод.ст.

Розрахункове теплове навантаження та відповідні витрати теплоносія визначено з урахуванням прийнятого температурного графіка теплової мережі 130/70 °С. Мінімально допустиме теплове навантаження та мінімальна витрата теплоносія прийняті виходячи з умов забезпечення працездатності внутрішньої системи опалення у режимах обмеженого теплопостачання [117].

Доступний перепад тиску на вводі в будівлю визначено за результатами гідравлічного аналізу мережі з урахуванням фактичних напорів у гілці теплової мережі. Мінімально необхідний перепад тиску прийнято на основі сумарних втрат тиску на регулювальному клапані, трубопровідній арматурі та внутрішній системі опалення з урахуванням експлуатаційного запасу, що забезпечує стабільну роботу ІТП в усьому діапазоні режимів. Для наочного порівняння та подальшого обґрунтування вибору принципової схеми на рисунку 4.5 наведено приклад залежної схеми ІТП.

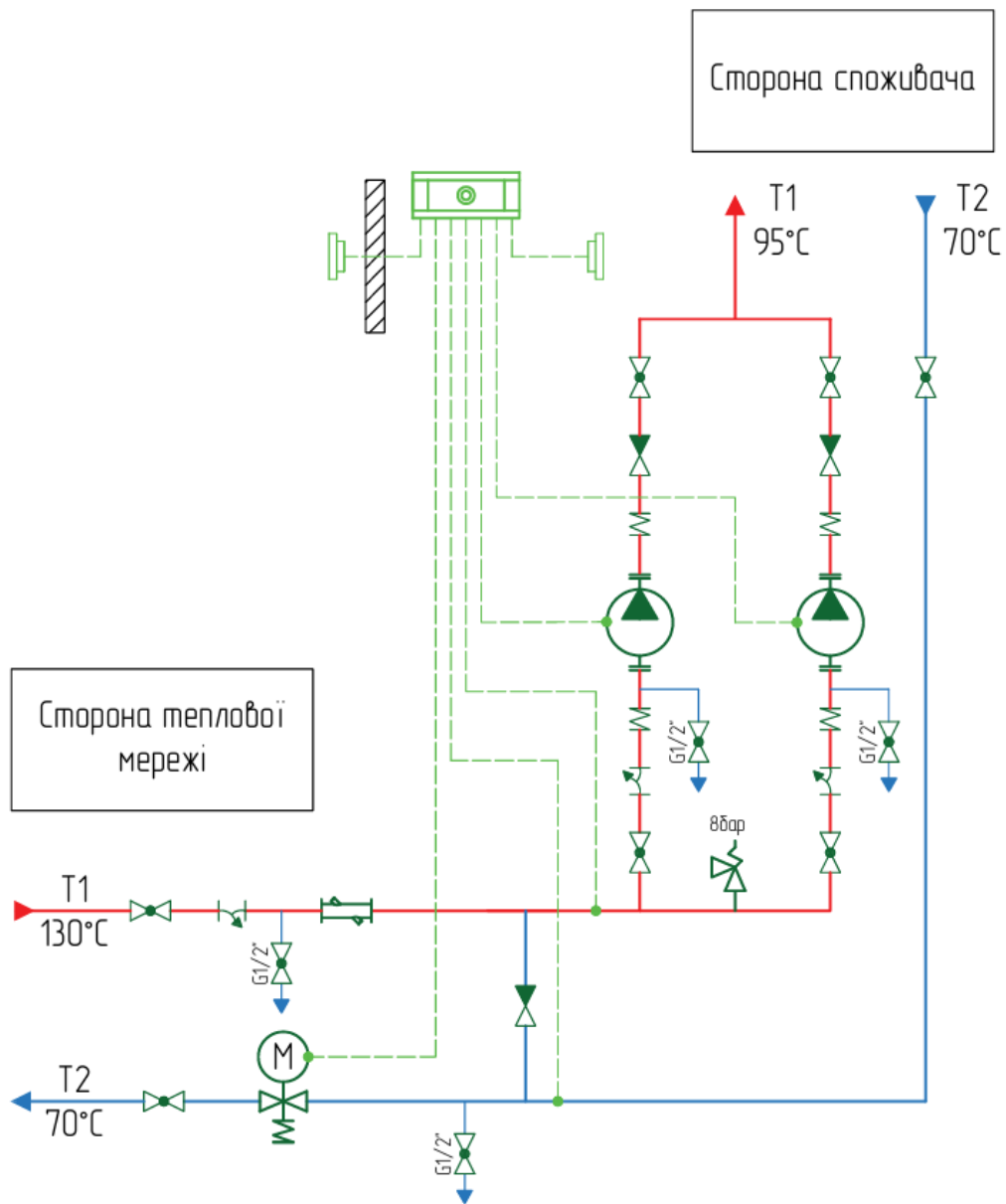


Рисунок 4.5 – Принципова схема ІТП з залежним типом підключення

На основі вихідних даних споживача, формується принципова схема ІТП, яка визначає склад обладнання, взаємозв'язок елементів та логіку регулювання теплового навантаження. Принципова схема є вихідною основою для подальшого гідравлічного розрахунку та підбору регулювального обладнання. Залежно від вихідних умов у практиці теплопостачання застосовуються дві базові схеми підключення споживача до теплової мережі: залежна та незалежна. При залежній схемі підключення теплоносій з теплової мережі безпосередньо подається до внутрішньої системи опалення будівлі.

Регулювання теплового навантаження та гідравлічного режиму в такій схемі здійснюється встановленим регулювальним органом на вводі [118]. Перевагою залежної схеми є конструктивна простота та відсутність проміжного теплообмінника. Разом з тим робота внутрішньої системи опалення в такій схемі безпосередньо пов'язана з режимами роботи теплової мережі.

Незалежна схема підключення передбачає розділення теплової мережі та внутрішньої системи опалення за допомогою теплообмінника [119]. У цьому випадку внутрішній контур будівлі працює в автономному гідравлічному режимі, а регулювання теплової потужності здійснюється шляхом керування витратою теплоносія в первинному контурі. На рисунку 4.6 наведено приклад незалежної схеми з теплообмінником.

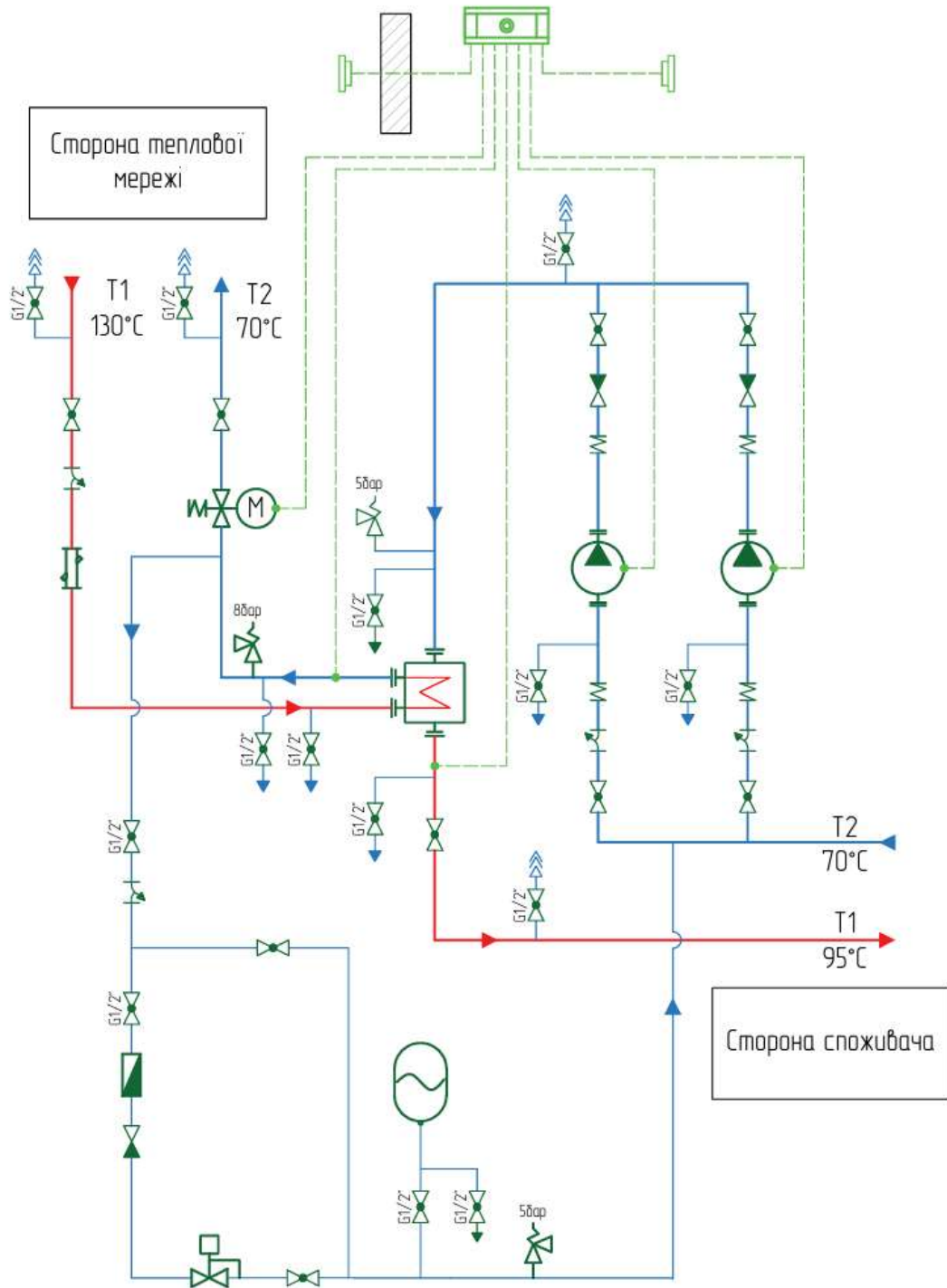


Рисунок 4.6 – Принципова схема ІТП з незалежним типом підключення

Незалежна схема забезпечує вищий рівень гідравлічної стабільності внутрішньої системи та знижує вплив коливань параметрів теплової мережі, проте супроводжується збільшенням складності вузла. Для огляду одного із факторів що впливають на вибір типу принципової схеми в таблиці 4.2 наведено порівняльну експлікацію обладнання обох схем.

Експлікація порівняння обладнання ІТП

№, поз.	Найменування	Залежна схема	Незалежна схема
1	Комбінований рег. клапан	+	+
2	Теплообмінний апарат	-	+
3	Циркуляційний насос	+	+
4	Лічильник теплоти	+	+
5	Лічильник піджив. води	-	+
6	Підживлювальний клапан	-	+
7	Розширювальний бак	-	+
8	Запобіжний клапан	+	+
9	Компл. автоматики та арматури	+	+

Подальший вибір принципової схеми локального теплового вузла для споживача за адресою м. Чорноморськ, вул. Данченка, 3 виконується на основі аналізу вихідних даних, та умов забезпечення стабільної роботи системи опалення в усьому діапазоні режимів теплопостачання.

Як видно з таблиці 4.2, незалежна схема ІТП характеризується більшою кількістю обладнання за рахунок наявності теплообмінника, та допоміжних елементів контуру споживача. Це ускладнює конструкцію вузла та підвищує вимоги до експлуатації. Залежна схема, у свою чергу, має компактнішу структуру та меншу кількість елементів, що позитивно впливає на надійність і простоту впровадження.

З урахуванням вихідних теплових та гідравлічних даних споживача, наведених у таблиці 4.1, зокрема достатнього доступного перепаду тиску на ввіді в будівлю ($\Delta p_{in} = 33,21$ м вод. ст.) та порівняно невеликого мінімально необхідного перепаду тиску для стабільної роботи системи ($\Delta p_{min} = 11$ м вод. ст.), у розглянутому випадку технічно можливим є застосування як залежної, так і незалежної схем підключення ІТП.

Разом з тим, у межах даного дослідження для подальшого моделювання прийнято незалежну схему підключення споживача. Такий вибір зумовлений більшою структурною складністю незалежної схеми, наявністю додаткового

обладнання та автономного вторинного контуру, що дозволяє більш повно дослідити вплив гідравлічних і регулювальних параметрів на роботу ІТП в умовах змінних режимів теплопостачання. Слід зазначити, що для даного споживача достатньою є і залежна схема підключення, однак її застосування обмежує глибину аналізу процесів регулювання та взаємодії елементів системи. Тому вибір незалежної схеми у даній роботі має дослідницький характер і спрямований на отримання більш універсальних результатів.

4.3 Моделювання ІТП та підбір основного обладнання

Гідравлічний розрахунок ІТП виконується з метою підбору основного обладнання (теплообмінника, регулювального клапана, насоса вторинного контуру) та перевірки працездатності вузла в усьому діапазоні режимів. Розрахунок проводиться на підставі вихідних даних споживача (табл. 4.1) і прийнятої принципової незалежної схеми підключення (рис. 4.6).

Теплообмінник підбирається за умовою забезпечення (Q_{design}) при розрахункових температурах первинного та вторинного контурів. У спрощеному вигляді перевірка виконується через рівняння теплопередачі:

$$Q = k * A * \Delta T_{lm}, \text{ (кВт)}, \quad (4.12)$$

де k – коефіцієнт теплопередачі, (Вт/(м² * К));

A – площа теплообмінної поверхні, (м²);

ΔT_{lm} – логарифмічний середній температурний напір.

Під час вибору ТОА додатково контролюються втрати тиску в первинному та вторинному каналах теплообмінника, які повинні бути узгоджені з доступним перепадом тиску на ввіді та напором насоса вторинного контуру відповідно. Для споживача «Данченка, 3» на основі таблиці 4.1 зафіксовано, що

(Δp_{in}) має достатній запас відносно (Δp_{min}) , що дозволяє забезпечити керувану роботу регульовального обладнання.

Підбір конкретного типорозміру теплообмінника в даній роботі розглядається як етап практичного проєктування, який у реальних умовах виконується з використанням спеціалізованого програмного забезпечення. Такі програмні комплекси враховують конструктивні особливості теплообмінників, реальні коефіцієнти теплопередачі, допустимі швидкості теплоносія, а також обмеження за гідравлічними втратами в первинному та вторинному каналах. Технічний паспорт ТОО для визначеного споживача наведено в Додатку Є.

Регульовальний клапан первинного контуру підбирається за пропускною здатністю:

$$G = K_v \sqrt{\Delta p} \rightarrow \Delta p = \left(\frac{G}{K_v} \right)^2, (\text{м}^3/\text{год}), \quad (4.13)$$

Для $G_{1,design} = 5,27$ (м³/год), клапан Dn32 має $K_{vs} = 16$ (м³/год), а клапан Dn25, $K_{vs} = 8$ (м³/год). Отже перепад тиску на клапані Dn32 та Dn25 складає 1,1 та 4,4 (м вод. ст.) відповідно.

Тобто типорозмір Dn25 має занадто високий перепад, а Dn32 — навпаки малий перепад для цього і встановлюється регулятор перепаду AFP2, який робить перепад керованим.

Далі необхідно виконати перевірку ходу клапана при уставці ($\Delta p_{set} = 0,3$ бар). Потрібний ефективний (K_v) у робочій точці:

$$K_{v,eff} = \frac{G}{\sqrt{\Delta p_{set}}}, (\text{м}^3/\text{год}), \quad (4.14)$$

Порівнюючи із $K_{vs} = 16$ (м³/год) та $K_{vs} = 8$ (м³/год) частка відкриття становить 60% та 42% відповідно це потрібний результат, є запас ходу і відсутня робота в зонні крайніх положень.

Для вузла регулювання первинного контуру прийнято комбінацію (регулятор витрати) VFG2 + (регулятор тиску) AFP2. Вибір типорозміру VFG2 виконано за умовою забезпечення розрахункової витрати ($G_{1,design} = 5,27 \text{ м}^3/\text{год}$) при уставці регулятора перепаду ($\Delta p_{set} \approx 0,3 \text{ бар}$). Розрахункове значення пропускної здатності в робочій точці становить ($K_{v,req} = 9,62 \text{ м}^3/\text{год}$), що забезпечується клапаном VFG2 DN32 з ($K_{vs} = 16 \text{ м}^3/\text{год}$). При цьому ступінь відкриття клапана у розрахунковому та мінімальному режимах становить орієнтовно 60% та 42% відповідно, що відповідає керованому діапазону роботи.

Для стабілізації перепаду тиску на регульовальному клапані у складі комбінованого вузла VFG2 + AFP2 обрано регулятор перепаду тиску AFP2 з діапазоном налаштування (0,1 – 1 бар). Такий діапазон забезпечує можливість встановлення уставки ($\Delta p_{set} \approx 0,3 \text{ бар}$), яка відповідає умовам керованої роботи клапана VFG2 DN32 при розрахунковій витраті теплоносія.

Для забезпечення передачі теплової потужності від теплообмінника до системи опалення будівлі необхідно виконати підбір циркуляційного насоса вторинного контуру, параметри якого визначаються розрахунковою витратою теплоносія та сумарними гідравлічними втратами у вторинному контурі.

Розрахункова витрата теплоносія у вторинному контурі визначається з рівняння теплового балансу:

$$G_{2,design} = \frac{Q_{design}}{1,163 * \Delta t_2}, (\text{м}^3/\text{год}), \quad (4.15)$$

де Q_{design} – розрахункове теплове навантаження споживача, (кВт);

Δt_2 – перепад температур, (°C).

Для режимів часткового навантаження мінімальна витрата становить:

$$G_{2,min} = \frac{Q_{min}}{1,163 * \Delta t_2}, \text{ (м}^3\text{/ГОД),} \quad (4.16)$$

де Q_{min} – мінімально допустиме теплове навантаження споживача при дефіциті теплоти, (кВт).

Необхідний напір циркуляційного насоса вторинного контуру визначається як сума гідравлічних втрат у характерних елементах контуру:

$$H_{pump} = R_{sys} + R_{arm} + R_{HE} + R_{res}, \text{ (м вод. ст.),} \quad (4.17)$$

де R_{sys} – опір внутрішньої системи опалення, (м вод. ст.);

R_{arm} – опір трубопроводної арматури, (м вод. ст.);

R_{HE} – опір ТОА, (м вод. ст.);

R_{res} – експлуатаційний запас, (м вод. ст.).

На основі отриманих значень робоча точка насоса вторинного контуру визначається координатами: $(G_{2,design}; H_{pump}) = (\text{ м}^3\text{/ГОД}; \text{ м вод. ст.})$.

Насос підбирається таким чином, щоб зазначена робоча точка розташовувалася в центральній частині його напірно-витратної характеристики, що забезпечує:

- стабільну роботу у номінальному режимі;
- можливість роботи при знижених витратах ($G_{2,min}$);
- резерв по напору для компенсації можливих змін гідравлічного опору системи в процесі експлуатації.

Конкретний типорозмір насоса визначається на стадії практичного проектування відповідно до каталожних характеристик виробника. Технічний

паспорт циркуляційного насосу для визначеного споживача наведено в Додатку Ж.

Виконане моделювання показує, що при прийнятих параметрах теплообмінника та внутрішньої системи опалення вторинний контур здатний забезпечити передачу розрахункової теплової потужності споживачу в усьому діапазоні режимів [120]. Параметри циркуляційного насоса узгоджуються з характеристиками первинного контуру, що підтверджує працездатність локального теплового вузла як єдиної гідравлічної системи.

Після завершення гідравлічного моделювання та підбору основного обладнання локального теплового вузла доцільно перевірити можливість практичної реалізації прийнятих інженерних рішень у межах теплового пункту. З цією метою виконано просторове моделювання ІТП у тривимірному середовищі із використанням програмного забезпечення Autodesk Autocad, яке дозволяє оцінити взаємне розташування теплообмінника, регулювального вузла первинного контуру, циркуляційного насоса вторинного контуру та трубопроводної арматури.

Тривимірна модель використовується як допоміжний інструмент для візуалізації результатів розрахунку, перевірки компоновочних рішень та доступності обладнання для монтажу і обслуговування. Також побудова тривимірної моделі дозволяє отримати точну специфікацію всіх необхідних матеріалів для монтажу даного ІТП.

Змодельований індивідуальний тепловий пункт із незалежною схемою підключення, призначений для забезпечення тепlopостачання житлового будинку в умовах змінних гідравлічних і теплових параметрів теплової мережі. Основною функцією вузла є передавання теплової енергії від мережевого теплоносія до внутрішньої системи опалення з можливістю керованої зміни теплового навантаження та забезпечення гідравлічної стабільності споживача. Специфікація виробів та матеріалів знаходяться в Додатку Є, а детальні монтажні креслення наведені в Додатку Ж. На рисунках 4.7 та 4.8 зображено візуалізацію тривимірної моделі ІТП.



Рисунок 4.7 – Візуалізація ІТП



Рисунок 4.8 – Візуалізація ІТП

Гідравлічне розділення первинного та вторинного контурів реалізується за допомогою теплообмінника, що забезпечує незалежність внутрішньої системи опалення від коливань тиску та витрати в тепловій мережі. Регулювання теплової потужності здійснюється у первинному контурі за допомогою комбінованого клапана з підтриманням сталого перепаду тиску, що створює умови для прогнозованої та керованої роботи вузла в широкому діапазоні режимів.

На стороні теплової мережі передбачено встановлення комерційного обліку теплової енергії, який забезпечує вимірювання витрати теплоносія та параметрів температурного графіка відповідно до чинних нормативних вимог [121]. Вторинний контур оснащений двома циркуляційними насосами з частотним регулюванням, що працюють за схемою «один робочий — один резервний». Таке рішення відповідає нормативним вимогам України щодо резервування насосного обладнання в системах опалення житлових будівель та забезпечує підвищену надійність тепlopостачання.

Для компенсації теплового розширення теплоносія та стабілізації тиску у вторинному контурі передбачено встановлення мембранного розширювального бака. Захист системи опалення від перевищення допустимого тиску забезпечується запобіжними клапанами, встановленими відповідно до вимог чинних нормативних документів. Для компенсації експлуатаційних втрат теплоносія у контурі споживача передбачено систему підживлення з автоматичним клапаном. Трубопровід підживлення обладнаний лічильником гарячої води з імпульсними виходами, що дозволяє здійснювати облік витрат теплоносія та передавати інформацію до системи диспетчеризації.

Усе обладнання ІТП разом із щитом автоматики змонтовано на цільній металевій несучій конструкції, що забезпечує компактність, заводську готовність вузла, зручність монтажу та обслуговування. Просторова 3D-модель підтверджує можливість практичної реалізації прийнятих схемних і розрахункових рішень, раціональність компоновки обладнання та доступність основних елементів для експлуатації і технічного обслуговування.

4.4 Аналіз режимів роботи ІТП при змінних умовах теплової мережі

У даному підрозділі виконується аналіз режимів роботи ІТП житлової будівлі за умов змінних параметрів тепlopостачання з боку теплової мережі. Аналіз ґрунтується на результатах проєктування ІТП [122], виконаного у підрозділі 4.3. Таким чином, об'єкт дослідження розглядається як технічно сформований та гідравлічно завершений, а всі подальші висновки стосуються виключно експлуатаційних режимів.

ІТП виконаний за незалежною схемою приєднання до теплової мережі. Первинний контур включає теплообмінник системи опалення та регулювальний вузол у складі клапана VFG2 DN32 з пропускною здатністю ($K_{vs} = 16$) та регулятора перепаду тиску AFP2 з діапазоном налаштування (0,1 – 1,0 бар) і прийнятою уставкою (0,3 бар) [123, 124]. Вторинний контур представлений системою опалення будівлі з двома циркуляційними насосами, (один робочий,

один резервний), розширювальним баком, запобіжними клапанами та автоматичним вузлом підживлення.

Розрахункові параметри ІТП відповідають проєктному тепловому навантаженню будівлі (Q_{design}). Розрахункова витрата теплоносія у первинному контурі становить ($G_{1,design}$) у вторинному контурі ($G_{2,design}$). Номінальний перепад тиску на ввіді в ІТП з боку теплової мережі прийнято рівним (Δp_{in}). Розрахункові температури прийняті відповідно до нормативної методики теплотехнічних розрахунків: внутрішня температура приміщень (t_{in}) розрахункова зовнішня температура (t_{out}). Метою підрозділу 4.4 є поетапне дослідження реакції ІТП на зміну зовнішніх мережевих умов. Аналіз виконується у логіці «умова \rightarrow реакція ІТП \rightarrow інженерний висновок» та поділяється на три взаємопов'язані блоки:

- гідравлічний аналіз працездатності ІТП при змінному перепаді тиску на ввіді за фіксованого теплового навантаження;
- тепловий аналіз роботи ІТП при номінальному напорі та змінному тепловому навантаженні, зумовленому погодними умовами;
- аналіз режимів дефіциту теплової потужності як надбудови над погодозалежним навантаженням.

Теплове навантаження будівлі у межах підрозділу розглядається як функція зовнішньої температури повітря з використанням лінійної залежності, характерної розрахунків систем опалення. Діапазон зміни зовнішньої температури приймається від -18 до $+8$ °С.

Поточне теплове навантаження будівлі при довільній температурі зовнішнього повітря (t_{out}) у межах опалювального періоду описується залежністю:

$$Q(t_{out}) = Q_{design} * \frac{t_{in} - t_{out}}{t_{in} - t_{out,n}}, \text{ (кВт)}, \quad (4.18)$$

де Q_{design} – розрахункове теплове навантаження будівлі, (кВт);

t_{in} – розрахункова внутрішня температура, (°C);

t_{out} – поточна температура зовнішнього повітря, (°C);

$t_{out,n}$ – розрахункова температура зовнішнього повітря, (°C).

На основі наведеної залежності формується температурно-навантажувальна характеристика споживача, яка використовується як базова для подальших сценаріїв аналізу. Дана залежність подана у вигляді графіка на рисунку 4.9.



Рисунок 4.9 – Залежність теплового навантаження ІТП від температури зовнішнього повітря

Сценарії дефіциту теплової енергії (10%, 20% і 30%) вводяться не як самостійні режими, а як коригувальні множники до погодозалежного теплового навантаження. Такий підхід дозволяє відокремити фізичну реакцію ІТП на зміну температурних і гідравлічних умов від організаційно-ресурсних обмежень системи тепlopостачання.

У межах підрозділу критеріями аналізу є виключно інженерні показники: забезпечення витрати теплоносія, стабільність регулювання, збереження працездатності обладнання та наявність або відсутність граничних режимів.

Це дозволяє використати результати підрозділу 4.4 як основу для узагальнення меж застосовності незалежних ІТП у сучасних умовах змінного та дефіцитного теплопостачання.

4.4.1 Аналіз працездатності ІТП при змінному перепаді тиску

На першому етапі аналізу розглядається ситуація, коли будівля потребує повного розрахункового теплового навантаження ($Q = Q_{design}$), а змінним фактором є доступний перепад тиску на вводі ІТП з боку теплової мережі (Δp_{in}). Така постановка задачі відповідає практичним умовам пікових морозів, коли навантаження максимально можливе, але гідравлічний режим мережі є нестабільним (перемикання насосів, зміна витрат у суміжних гілках, перерозподіл тисків у магістралях тощо).

Працездатність ІТП у цьому пункті трактується як здатність первинного контуру забезпечити витрату, достатню для передачі теплової потужності (Q_{design}) на теплообмінник, без втрати керованості регулювання.

У первинному контурі ІТП доступний перепад тиску (Δp_{in}) розподіляється між:

- втратами тиску у трубопроводах та арматурі;
- перепадом на теплообміннику;
- перепадом на тепловому лічильнику;
- перепадом на регульовальному клапані, який має бути достатнім для реалізації потрібної витрати при заданому положенні штока.

Особливість даної схеми полягає в тому, що АFR2 підтримує майже сталий перепад на регульовальному органі (орієнтовно на рівні уставки $\approx 0,3$ бар) у межах своїх конструктивних можливостей. Це означає:

- при достатньому (Δp_{in}) коливання тиску з боку мережі переважно «поглинаються» регулятором, а витрата залишається керованою (тиско-незалежне регулювання);

- при недостатньому (Δp_{in}) регулятор перепаду втрачає можливість підтримувати уставку, відкривається до межі ходу, і система переходить у режим, де витрата визначається лише гідравлікою мережі (фактично — «що може пройти, те й пройде»).

Для практичного аналізу (Δp_{in}) змінюється у певному діапазоні від занижених значень до номінального та підвищеного рівня [125]. На основі вхідних даних побудовано графік залежності ($G_{1, fact} = f(\Delta p_{in})$), який проілюстровано на рисунку 4.10. Для інженерної інтерпретації важливі дві зони:

- зона стабільної роботи: при ($\Delta p_{in} \geq \Delta p_{in, min}$) витрата підтримується на рівні, достатньому для (Q_{design}), а регулювання зберігає керованість;
- зона граничних/непрацездатних режимів: при ($\Delta p_{in} < \Delta p_{in, min}$) витрата падає нижче необхідної, що безпосередньо означає недостатню подачу теплової потужності на теплообмінник.

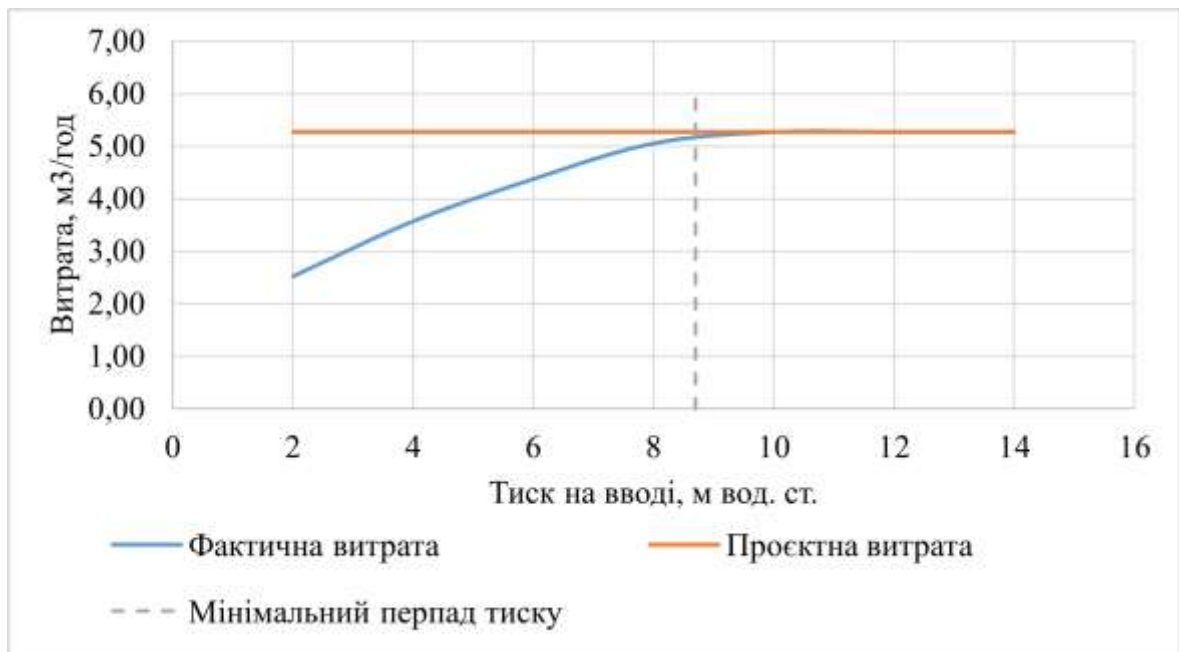


Рисунок 4.10 – Залежність витрати первинного контуру від вхідного перепаду тиску

На рисунку 4.10 наведено залежність фактичної витрати теплоносія у первинному контурі ІТП від вхідного перепаду тиску з боку теплової мережі при фіксованому тепловому навантаженні ($Q = Q_{design}$). Видно, що при ($\Delta p_{in} < \Delta p_{in,min}$) регулятор перепаду тиску АРР2 втрачає можливість підтримувати задану уставку, внаслідок чого витрата через теплообмінник зменшується. При ($\Delta p_{in} \geq \Delta p_{in,min}$) забезпечується стабілізація перепаду тиску на регулювальному клапані, а витрата підтримується на рівні розрахункової.

4.4.2 Аналіз роботи ІТП при змінному тепловому навантаженні

У даному підрозділі розглядається робота ІТП за умов змінного теплового навантаження будівлі при фіксованому номінальному перепаді тиску на вводі з боку теплової мережі. Вхідний перепад тиску приймається сталим, що відповідно до результатів підрозділу 4.4.1, забезпечує стабільну роботу регулювального вузла в зоні підтримання заданого перепаду тиску на регулювальному клапані.

Зміна режимів роботи ІТП у цьому випадку зумовлюється виключно зміною теплового навантаження будівлі, яке визначається температурою зовнішнього повітря. Погодно-залежна модель теплового навантаження, визначена в формулі (4.24) розділу 4.4.

Необхідна витрата теплоносія у первинному контурі при змінному тепловому навантаженні визначається пропорційно відношенню поточного теплового навантаження до розрахункового:

$$G_1(t_{out}) = G_{1,design} * \frac{Q(t_{out})}{Q_{design}}, (\text{м}^3/\text{ГОД}) \quad (4.19)$$

де $G_{1,design}$ – розрахункова витрата теплоносія у первинному контурі ІТП, ($\text{м}^3/\text{ГОД}$);

t_{out} – розрахункова температура зовнішнього повітря, °С.

Оскільки перепад тиску на регулювальному клапані в робочому діапазоні стабілізований, витрата теплоносія є пропорційною ефективній пропускній здатності клапана. За умови заданої уставки регулятора перепаду тиску максимальна можлива витрата теплоносія через повністю відкритий клапан визначається його номінальною пропускною здатністю:

$$G_{1,max} = k_{vs}\sqrt{\Delta p_{set}}, \text{ (м}^3\text{/год)}, \quad (4.20)$$

Для аналізу керуючої дії регулювального вузла у підрозділі вводиться відносний показник відкриття регулювального клапана, який визначається як частка реалізованої пропускної здатності відносно її максимального значення:

$$y(t_{out}) = 100 * \frac{G_1(t_{out})}{G_{1,max}}, \text{ (%)}, \quad (4.21)$$

де $y(t_{out})$ – відносне відкриття регулювального клапана від максимально реалізованої пропускної здатності клапана.

У міру зниження температури зовнішнього повітря теплове навантаження будівлі зростає, що призводить до збільшення необхідної витрати теплоносія у первинному контурі та відповідного зростання відносного відкриття регулювального клапана. При підвищенні температури зовнішнього повітря відбувається зворотний процес — зменшення теплового навантаження, прикривання клапана та зниження витрати теплоносія.

На рисунку 4.11 наведено залежності теплового навантаження будівлі та відносного відкриття регулювального клапана від температури зовнішнього повітря при номінальному перепаді тиску на вводі.

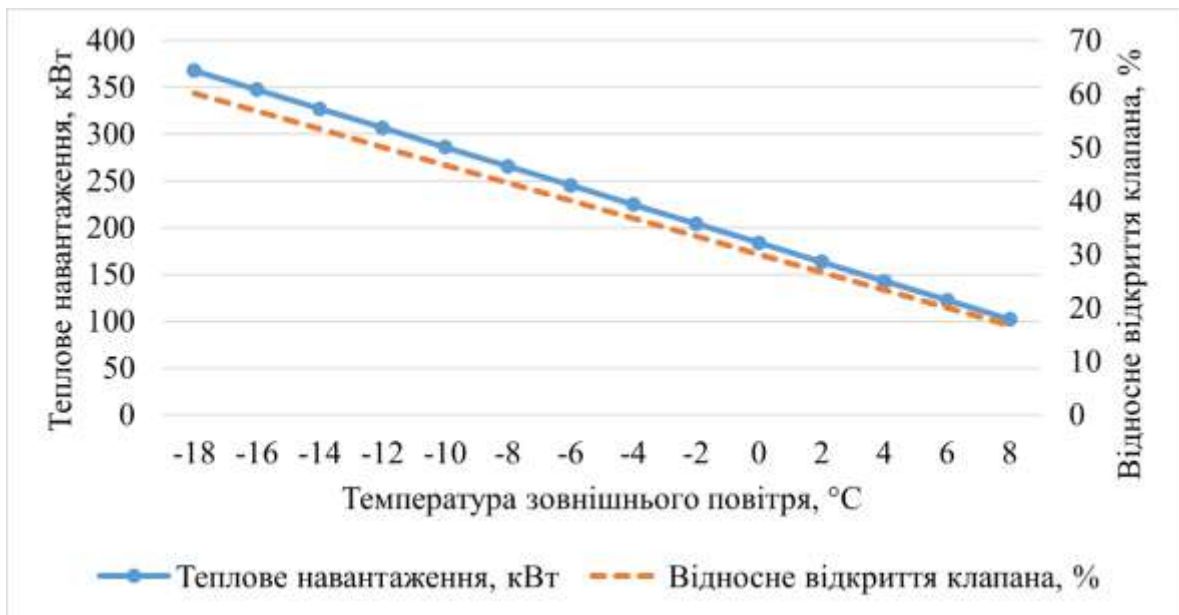


Рисунок 4.11 – Залежність теплового навантаження та відносного відкриття клапана від температури зовнішнього повітря

Як видно з графіка, у всьому розглянутому діапазоні температур регулювальний клапан працює в межах свого робочого діапазону та має запас по пропускній здатності навіть у розрахунковому режимі максимального навантаження.

Отримані результати свідчать, що за відсутності гідравлічних обмежень з боку теплової мережі ІТП забезпечує плавне та кероване погодо-залежне регулювання теплової потужності [126]. Даний режим розглядається як еталонний і використовується надалі для аналізу роботи ІТП за умов дефіциту теплової енергії, що розглядається у наступному підрозділі.

4.4.3 Аналіз роботи ІТП при введенні сценаріїв дефіциту теплоти

У даному підрозділі розглядається робота ІТП за умов дефіциту теплової енергії з боку теплової мережі. Під дефіцитом теплоти в подальшому розуміється ситуація, за якої фактично доступна теплова потужність є меншою за теплову потребу будівлі, визначену погодозалежною моделлю. Аналіз проводиться для трьох характерних сценаріїв дефіциту: 10 %, 20 % та 30 %.

На відміну від попереднього підрозділу, де розглядався еталонний режим роботи ІТП за повного забезпечення теплової потужності, у даному випадку дефіцит теплоти накладається на поточне теплове навантаження будівлі, а не на його розрахункове значення. Такий підхід дозволяє коректно описати реальні умови експлуатації теплових мереж у періоди обмеження теплової потужності джерела або пропускної здатності магістральних трубопроводів.

Цільове теплове навантаження, яке може бути реалізоване ІТП за умов дефіциту, визначається залежністю:

$$Q_{tar}(t_{out}, K_{final}) = (1 - K_{final}) * Q(t_{out}), \text{ (кВт)} \quad (4.22)$$

де $Q(t_{out})$ – погодо-залежне теплове навантаження споживача, (кВт);

K_{final} – коефіцієнт дефіциту теплової потужності.

За аналогією з еталонним режимом, необхідна витрата теплоносія у первинному контурі ІТП при дефіциті теплоти визначається пропорційно зменшеному тепловому навантаженню:

$$G_{1,tar}(t_{out}, K_{final}) = G_{1,design} * \frac{Q_{tar}(t_{out}, K_{final})}{Q_{design}}, \text{ (м}^3\text{/ГОД)} \quad (4.23)$$

Оскільки регулятор перепаду тиску забезпечує стабілізацію перепаду тиску на регульовальному клапані в межах його робочого діапазону, зменшення теплового навантаження за умов дефіциту реалізується шляхом додаткового прикривання регульовального клапана. Відносне відкриття клапана при дефіциті теплоти визначається як:

$$y_{tar}(t_{out}, K_{final}) = 100 * \frac{G_{1,tar}(t_{out}, K_{final})}{G_{1,max}}, \text{ (%)} \quad (4.24)$$

де $G_{1,max}$ – максимальна витрата теплоносія через регулювальний клапан при заданому перепаді тиску, ($\text{м}^3/\text{год}$).

Таким чином, у режимах дефіциту теплоти регулювальний клапан переходить у зону меншого відкриття порівняно з еталонним режимом. При цьому гідравлічна працездатність ІТП зберігається, оскільки зменшення витрати теплоносія не призводить до виходу регулювального органу за межі його робочого діапазону. Основним наслідком дефіциту є не порушення стабільності регулювання, а розрахункове обмеження теплової енергії відпущеної споживачу. На рисунках 4.12 проілюстровано зміну теплового навантаження та відносного відкриття регулювального клапана при різних рівнях дефіциту теплоти (10 %, 20 %, 30 %) залежно від температури зовнішнього повітря.

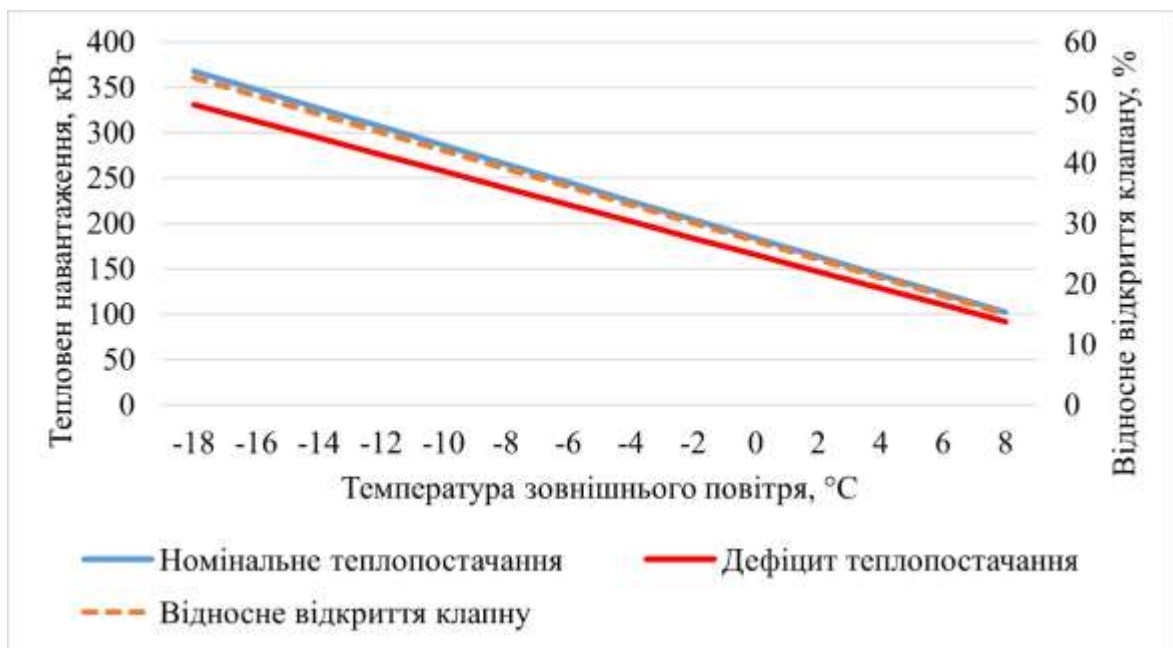


Рисунок 4.12 – Залежність теплопостачання і відносного відкриття регулювального клапана від температури зовнішнього повітря при умові дефіциту 10%

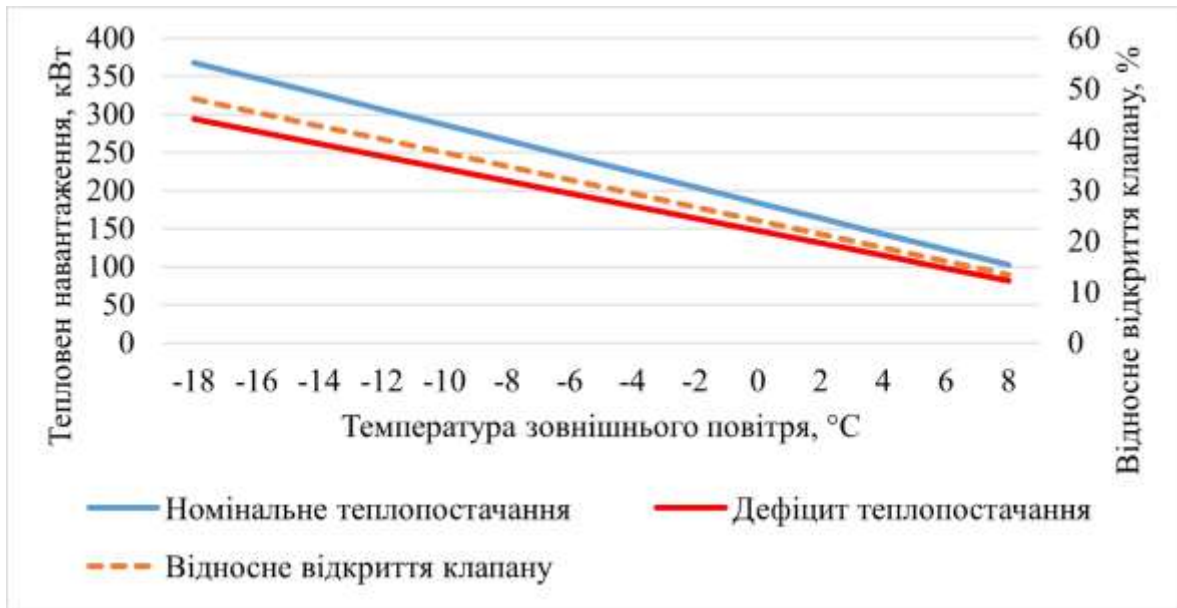


Рисунок 4.13 – Залежність теплопостачання і відносного відкриття регулювального клапана від температури зовнішнього повітря при умові дефіциту 20%

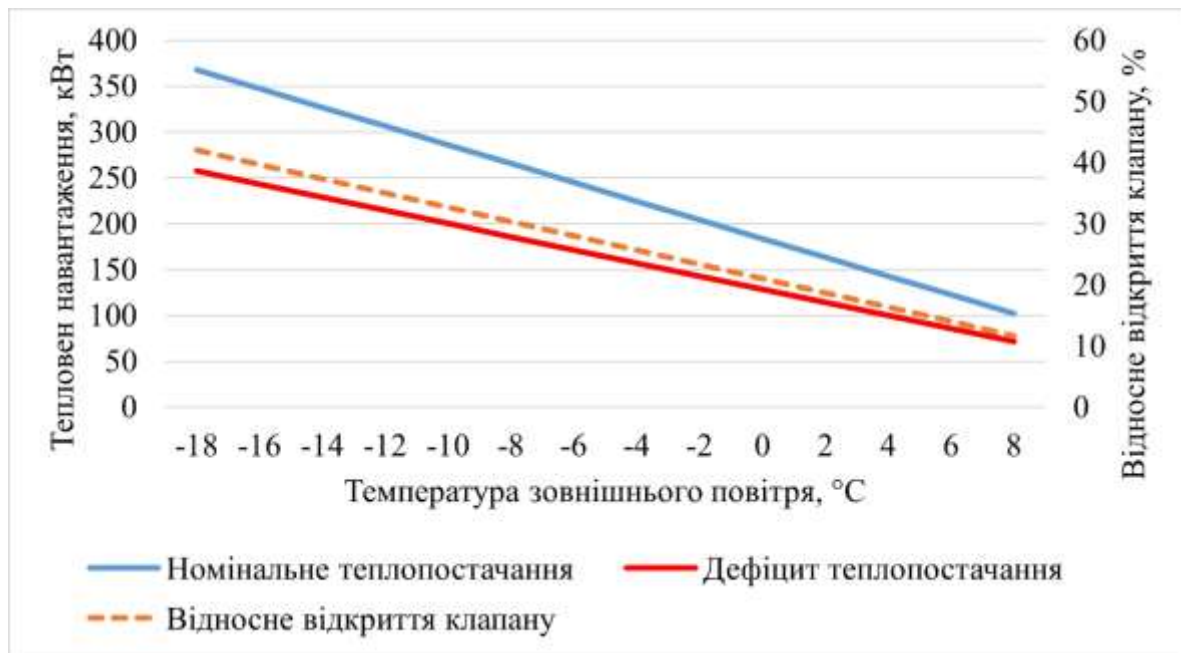


Рисунок 4.14 – Залежність теплопостачання і відносного відкриття регулювального клапана від температури зовнішнього повітря при умові дефіциту 30%

Порівняння отриманих залежностей з номінальним режимом показує, що навіть за значних рівнів дефіциту теплоти (до 30 %) ІТП з незалежною

схемою підключення зберігає керованість та гідравлічну стабільність. Водночас відхилення фактично реалізованого теплового навантаження від розрахункової потреби будівлі зростає зі збільшенням дефіциту.

Отримані результати створюють основу для визначення меж працездатності ІТП та формулювання узагальнених висновків щодо його роботи в умовах обмеження теплової потужності, що розглядається у наступному підрозділі.

4.4.4 Межі працездатності та узагальнення

На підставі результатів аналізу еталонного режиму роботи ІТП та режимів з обмеженням доступної теплової потужності у попередніх підрозділах визначаються межі працездатності індивідуального теплового пункту та узагальнюються характерні особливості його роботи за змінних умов теплопостачання.

У еталонному режимі, що відповідає ($K_{final} = 1$), ІТП працює за стабілізованого перепаду тиску на регулювальному клапані, а погодозалежна зміна теплового навантаження реалізується шляхом плавної зміни витрати теплоносія та відносного відкриття клапана. У всьому діапазоні температур зовнішнього повітря регулювальний орган перебуває в межах робочої зони та має запас по пропускну здатності, що свідчить про гідравлічну працездатність і керованість ІТП.

За умов обмеження доступної теплової потужності, яке в роботі описується коефіцієнтом реалізації теплового навантаження ($K_{final}[0,1; 0,2; 0,3]$), зменшення теплопостачання відбувається пропорційно поточному сценарію дефіциту. При цьому регулювальний клапан переходить у зону меншого відносного відкриття, однак не виходить за межі свого робочого діапазону. Отже, зменшення (K_{final}) не призводить до втрати стабільності ІТП.

4.5 Інтеграція ІТП в систему пріоритетного регулювання теплопостачання

У сучасних системах централізованого теплопостачання індивідуальний тепловий пункт доцільно розглядати не як ізолюваний вузол локального регулювання, а як виконавчий елемент системного алгоритму розподілу теплової енергії. Такий підхід дозволяє узгодити результати теплового балансування на рівні всієї мережі з фактичною подачею теплоносія окремим споживачам.

Алгоритм пріоритетного регулювання, сформований у попередніх розділах роботи, визначає цільові коефіцієнти теплопостачання для кожного споживача залежно від сценарію дефіциту ресурсу, класу об'єкта та розрахункового теплового навантаження. Результатом роботи цього алгоритму є задане значення теплової потужності або відповідної витрати теплоносія, яку необхідно реалізувати на ввіді споживача. Реалізація такого керування можлива лише за наявності технічного вузла, здатного точно відтворювати задану витрату незалежно від змін гідравлічних умов у мережі.

Запропонований у розділі 4 індивідуальний тепловий пункт на базі регулюючого клапана з функцією стабілізації перепаду тиску та електроприводом забезпечує саме таку можливість. Стабілізація перепаду тиску на регулювальному органі усуває вплив коливань тиску в магістральній мережі, а електропривод дозволяє змінювати положення клапана відповідно до керуючого сигналу. У результаті фактична витрата теплоносія визначається виключно командою керування, а не випадковими гідравлічними факторами.

Керування ІТП у складі системи пріоритетного регулювання здійснюється через зміну витрати теплоносія. На рівні диспетчерської або автоматизованої системи керування формується цільове значення витрати (або коефіцієнта її обмеження), яке передається на електропривід регулювального клапана [127]. ІТП не аналізує причини зміни режиму (дефіцит палива, аварійний стан чи оптимізація навантаження), а виконує лише функцію точного дозування

теплоносія відповідно до заданого значення. Такий розподіл функцій дозволяє розділити теплову логіку та гідравлічну реалізацію керування.

Особливе значення інтеграція ІТП набуває в умовах дефіциту теплового ресурсу. За наявності стабілізації перепаду тиску зменшення витрати на одному споживачі не призводить до неконтрольованого перетоку теплоносія до інших об'єктів. Це принципово відрізняє сучасний ІТП від елеваторних вузлів, у яких відсутня можливість незалежного керування витратою, а будь-які обмеження призводять до порушення гідравлічного балансу мережі [128].

Таким чином, індивідуальний тепловий пункт, оснащений регулювальним клапаном із функцією стабілізації перепаду тиску та електроприводом, може бути використаний як локальний виконавчий елемент системи пріоритетного регулювання тепlopостачання [129,130]. Його застосування забезпечує технічну реалізацію алгоритмів розподілу теплової енергії, узгоджену з гідравлічними можливостями мережі, та створює передумови для впровадження адаптивного керування теплом у масштабах міської системи тепlopостачання.

4.6 Практична реалізація методики пріоритетного регулювання в тепловій мережі

Практична перевірка розробленої методики пріоритетного регулювання тепlopостачання виконувалась з метою підтвердження можливості її застосування в реальних умовах теплової мережі та оцінки керованості розподілу теплової енергії між споживачами в умовах дефіциту теплової потужності джерела.

Дослідження проводилось на фрагменті міської теплової мережі з неоднорідними гідравлічними умовами та споживачами різних категорій за тепловими навантаженнями. Вихідні дані відповідали фактичним параметрам експлуатації, включаючи теплові навантаження споживачів, доступну теплову потужність джерела та можливі сценарії обмеження теплового ресурсу.

Перевірка методики виконувалась для кількох сценаріїв дефіциту теплової потужності, що імітували режими роботи системи при обмеженні генерації тепла. Для кожного сценарію визначались:

- доступний сумарний тепловий ресурс;
- коефіцієнти теплопостачання споживачів відповідно до алгоритму пріоритетного регулювання;
- фактична тепла подача споживачам з урахуванням заданих обмежень.

Основними критеріями оцінки працездатності методики були:

- забезпечення гарантованої теплової подачі споживачам пріоритетних категорій;
- відсутність неконтрольованого перерозподілу теплоносія між споживачами;
- керований характер зниження теплової подачі;
- узгодженість теплового розподілу з гідравлічними можливостями мережі.

Результати показали, що застосування розробленого алгоритму дозволяє реалізувати керований розподіл теплової енергії без порушення гідравлічної стабільності системи. На відміну від традиційних режимів роботи, у яких дефіцит теплової потужності призводить до випадкового перерозподілу витрат теплоносія, запропонований підхід забезпечує прогнозований характер зміни теплового навантаження споживачів.

При цьому дефіцит теплової потужності компенсується не за рахунок гідравлічного перерозподілу потоків, а шляхом цілеспрямованої зміни теплової подачі відповідно до заданих коефіцієнтів забезпечення.

Отримані результати підтверджують можливість використання методики як інструменту оперативного управління теплопостачанням у дефіцитних режимах без необхідності зміни базових гідравлічних параметрів системи.

4.7 Технічні умови та рекомендації щодо впровадження ІТП в системі пріоритетного регулювання

Проведені дослідження показали, що індивідуальні теплові пункти слід розглядати як виконавчі елементи системи пріоритетного регулювання, які забезпечують фізичну реалізацію алгоритмічно визначених режимів теплопостачання.

Заміна елеваторних вузлів на автоматизовані ІТП дозволяє перейти від гідравлічно залежного режиму теплопостачання до керованого регулювання витрати теплоносія. На відміну від елеваторних схем, у яких теплова подача визначається перепадом тиску в мережі, ІТП забезпечують можливість підтримання заданої витрати теплоносія незалежно від коливань гідравлічного режиму.

Водночас встановлено, що сам факт впровадження ІТП не гарантує можливості реалізації пріоритетного регулювання. За відсутності стабілізації перепаду тиску робота ІТП залишається залежною від гідравлічного режиму мережі, що може призводити до неконтрольованого перерозподілу теплоносія.

Для забезпечення працездатності системи пріоритетного регулювання необхідним є застосування ІТП із тиско-незалежним регулюванням витрати.

Споживачі з малими та середніми тепловими навантаженнями

Для споживачів з тепловими навантаженнями до 500 кВт доцільним є застосування схем ІТП із функціональним розділенням стабілізації перепаду тиску та регулювання витрати теплоносія на базі модульного регулюючого органу.

Споживачі з великими тепловими навантаженнями

Для споживачів з тепловими навантаженнями понад 500 кВт можливе застосування комбінованих регулюючих клапанів із функцією стабілізації перепаду тиску за умови відповідності їх робочих характеристик фактичним витратам теплоносія.

Обов'язковою умовою є забезпечення можливості зовнішнього керування витратою теплоносія, що дозволяє інтегрувати ІТП у систему пріоритетного регулювання.

Загальні рекомендації щодо впровадження

Впровадження ІТП доцільно виконувати поетапно. На першому етапі необхідно забезпечити гідравлічну стабілізацію мережі та відновлення розрахункових режимів роботи. На другому етапі впроваджується кероване регулювання витрати теплоносія. На завершальному етапі здійснюється інтеграція ІТП у систему диспетчерського керування.

Такий підхід дозволяє:

- мінімізувати ризики порушення роботи мережі;
- уникнути неконтрольованого перерозподілу теплоносія;
- забезпечити поступовий перехід до адаптивного керування теплопостачанням.

4.8 Обмеження застосування та умови ефективної реалізації моделі

Запропонована модель призначена для застосування в реальних теплових мережах з обмеженими тепловими ресурсами та неоднорідними гідравлічними умовами. Водночас її ефективність визначається технічним станом мережі та достовірністю вихідних даних.

Модель не призначена для компенсації критичних дефектів теплової мережі. За наявності значних гідравлічних порушень першочерговими заходами повинні бути:

- усунення аварійних ділянок;
- відновлення пропускної здатності трубопроводів;
- приведення режимів роботи насосного обладнання до розрахункових значень.

Модель використовує гідравлічний режим як вихідну умову та не замінює заходів гідравлічного балансування. Ефективність реалізації також залежить від якості вихідних даних щодо теплових навантажень та пріоритетності

споживачів. Використання некоректних даних може призводити до формального виконання алгоритму без фактичного підвищення ефективності теплопостачання.

Мінімально необхідний набір даних включає:

- розрахункові теплові навантаження;
- класи пріоритетності споживачів;
- доступну теплову потужність джерела;
- технічні можливості регулювання на рівні ІТП.

Важливою умовою є поєднання автоматизованих систем керування з функціями диспетчерського контролю. Модель формалізує процес прийняття рішень, але не виключає участі експлуатаційного персоналу.

До типових помилок впровадження належать:

- впровадження алгоритму без гідравлічної стабілізації;
- використання ІТП без стабілізації перепаду тиску;
- некоректне визначення пріоритетних категорій;
- повна автоматизація без контролю персоналу.

Рекомендується впровадження моделі починати з окремих ділянок мережі з подальшим масштабуванням. Для узагальнення умов застосування моделі її основні характеристики представлені у вигляді інженерного паспорта.

Таблиця 4.3 (початок)

Паспорт моделі пріоритетного регулювання теплопостачання

Параметр	Опис
Мета	Забезпечення керованого та справедливого розподілу теплової енергії між споживачами в умовах дефіциту ресурсу
Об'єкт керування	Система теплопостачання з центральним тепловим пунктом та локальними ІТП
Рівні реалізації	Системний (алгоритм розподілу) та локальний (ІТП як виконавчий елемент)
Вихідні дані	Розрахункові теплові навантаження споживачів, класи пріоритетності (А–Е), сценарій дефіциту

Таблиця 4.3 (закінчення)

Параметр	Опис
Гідравлічна основа	Попередньо визначені еквівалентні опори споживачів та стабілізований перепад тиску
Регульована величина	Витрата теплоносія на вводі споживача
Технічна реалізація	ІТП з регулюючим клапаном, стабілізацією перепаду тиску та електроприводом
Спосіб керування	Зміна положення регулюючого органу відповідно до цільового коефіцієнта постачання
Роль SCADA	Формування керуючих сигналів та моніторинг параметрів (опційно)
Очікуваний ефект	Підвищення керованості, зниження гідравлічних перекосів, захист пріоритетних споживачів
Обмеження	Не усуває дефекти мережі без гідравлічної стабілізації
Передумови впровадження	Наявність стабілізації (Δp) та можливість регулювання витрати
Рівень готовності	Методика доведена до рівня практичного застосування на реальному об'єкті

Висновки до розділу

У розділі виконано комплексне інженерно-математичне дослідження модернізації вузлів підключення споживачів до теплової мережі з позицій їх сумісності з алгоритмами адаптивного та пріоритетного регулювання. Аналіз проведено на прикладі житлового споживача з розрахунковим навантаженням 368 кВт за температурного графіка 130/70 °С та номінального перепаду тиску на вводі 33,21 м вод. ст., що дозволило отримати кількісну оцінку меж працездатності різних схем підключення.

Основні результати розділу полягають у такому:

1. Математичне моделювання елеваторного вузла підтвердило його жорстку залежність від розрахункового перепаду тиску. За зниження (Δp) до 20–25 м вод. ст. тепла потужність зменшується до 15–45 % від номінальної, а при (Δp) < 16 м вод. ст. елеватор переходить у непрацездатний режим.

2. Встановлено, що елеваторний вузол не забезпечує керованості витрати теплоносія та є функціонально несумісним із реалізацією алгоритмів пріоритетного розподілу теплової енергії.
3. Дослідження комбінованого клапана AFQMP 2 показало, що при малих витратах теплоносія фактичний перепад тиску на регулювальному органі не досягає мінімально необхідних значень (0,2–0,3 бар), унаслідок чого клапан працює поза режимом тиско-незалежного регулювання.
4. Як альтернативу обґрунтовано модульний ІТП на базі клапана VFG 2, регулятора перепаду тиску AFP 2 та електропривода АМЕі 6. Розрахунки підтвердили наявність запасу по пропускній здатності та відсутність роботи клапана в крайніх положеннях як у номінальному, так і в мінімальному режимах.
5. Показано, що ІТП забезпечує стабільне погодо-залежне регулювання в діапазоні температур зовнішнього повітря від -18 до $+8$ °С, а в сценаріях дефіциту 10–30 % зберігає гідравлічну стійкість, реалізуючи обмеження теплової потужності без виходу обладнання за межі робочого діапазону.
6. Встановлено, що гідравлічна межа працездатності ІТП у досліджених режимах не досягається; обмеження має тепловий характер і визначається ресурсними можливостями джерела теплоти.

Таким чином, у розділі підтверджено, що стабілізація перепаду тиску є необхідною технічною умовою впровадження алгоритмів пріоритетного регулювання. Модульний індивідуальний тепловий пункт розглядається як локальний виконавчий елемент системного алгоритму керування теплопостачанням, здатний забезпечити гідравлічну стабільність і адаптивність режимів у змінних експлуатаційних умовах.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено науково-прикладну задачу підвищення керованості міських систем теплопостачання в умовах обмеженості енергоресурсів шляхом розроблення та обґрунтування методики пріоритетного регулювання теплової енергії з урахуванням гідравлічних умов мережі та технічних можливостей локальних теплових вузлів споживачів.

У результаті виконаних досліджень отримано такі основні висновки.

1. Проаналізовано сучасний стан міських систем теплопостачання та показано, що традиційні підходи до регулювання не забезпечують керованого та справедливого розподілу теплової енергії в умовах дефіциту. Встановлено, що ключовими причинами порушення режимів теплопостачання є нерівномірний розподіл перепаду тиску в мережі, гідравлічне «витіснення» малих споживачів та відсутність пріоритетної логіки керування.
2. Розроблено гідравлічно-теплову модель, яка принципово відрізняється від відомих підходів розділенням задачі гідравлічного балансування теплової мережі та задачі теплового розподілу між споживачами. Гідравлічний режим мережі визначається окремо на основі загальних залежностей втрат напору, тоді як тепла частина реалізується у вигляді формалізованого алгоритму пріоритетного розподілу теплової енергії.
3. Запропоновано алгоритм пріоритетного регулювання теплопостачання, який базується на класифікації споживачів за важливістю та використанні модератора теплового навантаження для керованого перерозподілу теплової енергії у дефіцитних режимах. Алгоритм дозволяє забезпечити гарантовану подачу тепла критичним споживачам та запобігти неконтрольованому перерозподілу ресурсу між вузлами мережі.

4. На основі математичного та режимного аналізу встановлено, що реалізація алгоритмів пріоритетного регулювання неможлива без стабілізації перепаду тиску на регулювальних органах споживачів. Показано обмеження застосування комбінованих регуляторів витрати типу AFQMP-2 у зонах малих витрат теплоносія та обґрунтовано доцільність використання схем із функціональним розділенням стабілізації перепаду тиску та регулювання витрати для малих і середніх споживачів.
5. Запропоновано та обґрунтовано конструктивні рішення індивідуальних теплових пунктів як локальних виконавчих елементів системи пріоритетного регулювання. Доведено, що індивідуальні теплові пункти не формують логіку пріоритетного розподілу самостійно, але забезпечують її фізичну реалізацію на рівні окремих споживачів шляхом точного відтворення заданих витрат теплоносія в умовах змінного перепаду тиску.
6. Проведено апробацію розробленої моделі на прикладі реальної теплової мережі та показано її працездатність у сценаріях дефіциту теплової потужності. Отримані результати підтверджують можливість керованого обмеження теплопостачання без порушення гідравлічної стабільності мережі та без втрати теплопостачання споживачів пріоритетних категорій.
7. Розроблено практичні рекомендації щодо вибору та застосування індивідуальних теплових пунктів для різних категорій споживачів, а також щодо поетапного впровадження пріоритетного регулювання на рівні теплової мережі. Показано, що методика не потребує повної реконструкції системи теплопостачання та може бути реалізована поступово із залученням мінімально необхідного набору вимірювальних та диспетчерських даних.
8. Визначено обмеження застосування запропонованої моделі, пов'язані з фактичним гідравлічним станом мережі, рівнем автоматизації та

якістю вихідних даних. Зазначені обмеження визначають межі коректного та ефективного використання методики в реальних умовах експлуатації.

Таким чином, у дисертаційній роботі сформовано науково обґрунтовану модель пріоритетного регулювання теплопостачання, яка дозволяє перейти від емпіричних та статичних методів обмеження теплової потужності до керованого, формалізованого і відтворюваного процесу розподілу теплової енергії в міських теплових мережах в умовах дефіциту енергоресурсів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. 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. DOI: 10.1016/j.energy.2023.127260.
2. 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.
3. International Energy Agency (IEA). Global annual heat deliveries to end-use sectors through district heating networks, 2000–2021. IEA Data & Statistics. Paris: IEA, 2022.
4. Pipeline insulation optimization in district heating networks // *Energy*. 2025. Vol. 340. Art. 139166. DOI: 10.1016/j.energy.2025.139166.
5. Directive (EU) 2023/1791 of the European Parliament and of the Council on energy efficiency (recast). Official Journal of the European Union. 2023. 31
6. Lund R., Østergaard D.S., Yang X., Mathiesen B.V. Comparison of low-temperature district heating concepts in a long-term energy system perspective // *International Journal of Sustainable Energy Planning and Management*. 2017. Vol. 12. DOI: 10.5278/ijsepm.2017.12.2.
7. Lund H., Mathiesen B.V. Smart energy systems and 4th generation district heating // *International Journal of Sustainable Energy Planning and Management*. 2018. Vol. 16. DOI: 10.5278/ijsepm.2018.16.1.
8. Bott A., Beykirch M., Steinke F. Efficient training of learning-based thermal power flow for 4th generation district heating grids. arXiv, 2024.
9. Chicherin S. Hydraulic balancing of district heating systems and improving thermal comfort in buildings // *Energies*. 2025. Vol. 18, No. 5. Art. 1259. DOI: 10.3390/en18051259.
10. Development of a physical hydraulic modelling tool for district heating systems // *Energy and Buildings*. 2021. Vol. 253. Art. 111512. DOI: 10.1016/j.enbuild.2021.111512. 103

11. Jiang M., Speetjens M., Rindt C., Smeulders D. A reduced-order model for dynamic simulation of district heating networks. arXiv, 2022.
12. Strehle F., et al. A unifying passivity-based framework for pressure and volume flow rate control in district heating networks., 2023.
13. Operation stability analysis of district heating substation from the control perspective // *Energy and Buildings*. 2017. Vol. 154. P. 373–390. DOI: 10.1016/j.enbuild.2017.08.034. 95
14. International Energy Agency (IEA). Ukraine’s energy system under attack – Ukraine’s energy security and the coming winter. Paris: IEA, 2024.
15. Salo S., et al. The impact of optimal demand response control and thermal energy storage on a district heating system // *Energies*. 2019. Vol. 12, No. 9. Art. 1678. DOI: 10.3390/en12091678.
16. Effects on district heating networks by introducing demand side economic model predictive control // *Energy and Buildings*. 2024. Vol. 309. Art. 114051. DOI: 10.1016/j.enbuild.2024.114051.
17. Rein M., Mohring J., Damm T., Klar A. Optimal control of district heating networks using a reduced order model., 2019. 67
18. Blizard A., Stockar S. A graph-based technique for the automated control-oriented modeling of district heating networks., 2023.
19. Chicherin S., et al. Energy efficiency of buildings in the cities of Ukraine under the conditions of sustainable development of centralized heat supply systems // *Energy and Buildings*. 2021. Vol. 247. Art. 110947. DOI: 10.1016/j.enbuild.2021.110947.
20. International Energy Agency (IEA). 350 million building units connected to district energy networks by 2030... IEA Analysis. Paris: IEA, 2022.
21. International Renewable Energy Agency (IRENA), Aalborg University. Integrating low-temperature renewables in district energy systems: Guidelines for policy makers. Abu Dhabi: IRENA, 2021.

22. Werner S. International review of district heating and cooling // *Energy*. – 2017. – Vol. 137. – P. 617–631. – DOI: 10.1016/j.energy.2017.04.045.
23. 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 «ХП», 2017. – С. 250.
24. 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.
25. Ширяєва Н. В., Білоцерківський О. Б. Розробка шляхів реформування систем централізованого теплопостачання України // *Вісник НТУ «ХП»*. – 2015. – № 59.
26. Демченко В. Г., Коник В. В. Reducing of non-productive heat losses in energy generation // *Вісник НТУ «ХП»*. Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – 2020. – № 1. – DOI: 10.20998/2078-774X.2020.01.05.
27. Wang Y., You S., Zhang H., Zheng W., Zheng X., Miao Q. Hydraulic performance optimization of meshed district heating network with multiple heat sources // *Energy*. – 2017. – Vol. 126. – P. 603–621. – DOI: 10.1016/j.energy.2017.03.044.
28. Ashfaq A., Ianakiev A. Investigation of hydraulic imbalance for converting existing boiler based buildings to low temperature district heating // *Energy*. – 2018. – Vol. 160. – P. 200–212. – DOI: 10.1016/j.energy.2018.07.001.
29. Баран Є. М., Кондратюк О. І. Автоматизація систем теплопостачання. Львів : Вид-во ЛНУ, 2020. 312 с.
30. Sommer T., Mennel S., Sulzer M. Lowering the pressure in district heating and cooling networks by alternating the connection of the expansion vessel // *Energy*. – 2019. – Vol. 172. – P. 991–996. – DOI: 10.1016/j.energy.2019.02.010.

31. Soltero V. M., Chacartegui R., Ortiz C., Quirosa G. Techno-economic analysis of rural 4th generation biomass district heating // *Energies*. – 2018. – Vol. 11, № 12. – Art. 3287. – DOI: 10.3390/en11123287.
32. Lund H., Werner S., Wiltshire R., Svendsen S., Thorsen J. E., Hvelplund F. та ін. 4th Generation District Heating (4GDH) // *Energy*. 2014. Vol. 68. P. 1–11
33. District Heating [Electronic resource]. – International Energy Agency. – Last update: 11 Jul 2023. – Mode of access: <https://www.iea.org/energy-system/buildings/district-heating> (accessed: 02.02.2026).
34. Lund H., Østergaard P. A., Connolly D., Mathiesen B. V. Smart Energy and Smart Energy Systems // *Energy*. 2017. Vol. 137. P. 556–565.
35. Фіалко Н. М., Тимченко М. П., Халатов А. А., Шеренковський Ю. В. Інтелектуальні енергетичні системи теплозабезпечення будівель // Збірник наукових праць. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2016. – С. 203–209.
36. 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.
37. Алексахін О. О., Бобловський О. В., Безвесільна Д. С. Підвищення ефективності централізованих систем теплопостачання житлових мікрорайонів // *MicroCAD–2017 : тези доповідей 25-ї міжнар. наук.-практ. конф.* – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – С. 241.
38. World Bank. Ukraine District Heating Modernization Project. URL: <https://projects.worldbank.org> (дата звернення: 20.08.2025).
39. Upgraded heating supply for Kryvyi Rih with €6.4 million from E5P and a €31.6 million loan from the EIB (2020-292) [Electronic resource]. – European Investment Bank, 2020. – Mode of access: <https://www.eib.org/en/press/all/2020-292-upgraded-heating-supply-for->

- [kryvyi-rih-in-ukraine-with-eur6-4-million-from-multi-donor-fund-e5p-and-a-eur31-6-million-loan-from-the-eib](#) (accessed: 02.02.2026).
40. Van Oevelen T., Neven T., Brès A., Schmidt R.-R., Vanhoudt D. Testing and evaluation of a smart controller for reducing peak loads and return temperatures in district heating networks // Smart Energy. – 2023. – Vol. 10. – Art. 100105. – DOI: 10.1016/j.segy.2023.100105.
41. Про теплопостачання : Закон України від 02.06.2005 № 2633-IV.
42. Про житлово-комунальні послуги : Закон України від 09.11.2017 № 2189-VIII.
43. Про комерційний облік теплової енергії та водопостачання : Закон України від 22.06.2017 № 2119-VIII.
44. Про внесення змін до деяких законів України щодо удосконалення регулювання у сфері теплопостачання : Закон України від 29.07.2022 № 2479-IX.
45. Ukraine Energy Damage Assessment (05.04.2023) [Electronic resource]. – United Nations Development Programme (UNDP) in Ukraine. – Mode of access: <https://www.undp.org/ukraine/publications/ukraine-energy-damage-assessment> (accessed: 02.02.2026).
46. Про затвердження Правил надання послуги з постачання теплової енергії : постанова Кабінету Міністрів України від 21.08.2019 № 830.
47. Про затвердження Порядку перевірки відповідності якості комунальних послуг умовам договору : постанова Кабінету Міністрів України від 27.12.2018 № 1145.
48. Про державне регулювання у сфері комунальних послуг : Закон України від 09.07.2010 № 2479-VI.
49. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. An EU Strategy on Heating and Cooling (COM(2016) 51 final, 16.02.2016) [Electronic resource]. – Mode of access:

- lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:52016DC0051 (accessed: 02.02.2026).
50. Winter package – heating and cooling [Electronic resource]. – European Commission, DG Energy, 2016. – Mode of access: https://energy.ec.europa.eu/publications/winter-package-heating-and-cooling_en (accessed: 02.02.2026).
51. Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council on the promotion of the use of energy from renewable sources (recast) [Electronic resource]. – Publications Office of the European Union, 2018. – Mode of access: <https://op.europa.eu> (accessed: 02.02.2026).
52. Directive (EU) 2023/1791 of the European Parliament and of the Council of 13 September 2023 on energy efficiency (recast) [Electronic resource]. – Publications Office of the European Union, 2023. – Mode of access: <https://op.europa.eu> (accessed: 02.02.2026).
53. Directive (EU) 2023/2413 of the European Parliament and of the Council amending Directive (EU) 2018/2001 [Electronic resource]. – Publications Office of the European Union, 2023. – Mode of access: <https://op.europa.eu> (accessed: 02.02.2026).
54. Hou J., Li H., Nord N., Huang G. Model predictive control for a university heat prosumer with data centre waste heat and thermal energy storage // Energy. – 2023. – Vol. 267. – Art. 126579. – DOI: 10.1016/j.energy.2022.126579.
55. Тимченко М. П., Фіалко Н. М. ВДЕ-генерація та системи теплопостачання житлово-комунального господарства України // Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті : матеріали XX міжнар. наук.-практ. конф. – Київ, 2019. – С. 42–47.
56. District heating and cooling in the European Union : Study [Electronic resource]. – European Commission, DG Energy, 2022. – Mode of access: https://energy.ec.europa.eu/publications/district-heating-and-cooling-european-union_en (accessed: 02.02.2026).

57. ДСТУ EN 13941-1:2022. Труби централізованого опалення. Проектування та встановлення теплоізольованих з'єднаних однотрубних і здвоєних систем для мереж гарячого водопостачання. Частина 1. Проектування.
58. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. Київ : Мінрегіонбуд України, 2013. 142 с.
59. 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.
60. Воїнов О., Елькін Ю. Про вплив на екологічну ефективність централізованих систем теплопостачання // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – 2022. – № 3–4. – DOI: 10.20998/2078-774X.2022.03.07.
61. Про затвердження Порядку перевірки відповідності якості комунальних послуг умовам договору : постанова Кабінету Міністрів України від 27.12.2018 № 1145.
62. Наказ Міністерства палива та енергетики України від 14.02.2007 № 71.
63. ДБН В.2.5-39:2008. Теплові мережі. Київ : Мінрегіонбуд України, 2008. 180 с.
64. 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. – DOI: 10.20535/1813-5420.2.2017.111686.
65. Ukraine Energy Damage Assessment (05.04.2023) [Electronic resource]. – United Nations Development Programme (UNDP) in Ukraine. – Mode of access: <https://www.undp.org/ukraine/publications/ukraine-energy-damage-assessment> (accessed: 02.02.2026).

- 66.He X., Zhou J., Li N., Chen S. Optimal control for district heating systems based on imbalance analysis of pipe networks // *Journal of Building Engineering*. – 2024. – Vol. 96. – Art. 110560. – DOI: 10.1016/j.jobe.2024.110560.
- 67.Lund H., Østergaard P. A., Connolly D., Mathiesen B. V. The status of 4th generation district heating: Research and results // *Energy*. 2018. Vol. 164. P. 147–159.
- 68.Strehle F., Machado J. E., et al. Passivity-based distributed control of pressure and flow in district heating networks // *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. 2023.
- 69.Liu J., Chen Q., Zhao Y. Balanced operation strategies of district heating systems based on dynamic hydraulic-thermal modeling // *Energy and Built Environment*. 2024.
- 70.Schindler M., Gnam L., Puchegger S. Optimization-based operation of district heating networks: A case study for two real sites // *Energies*. 2023. Vol. 16.
- 71.Oldewurtel F., et al. Economic model predictive control for building heating systems connected to district heating // *Energy and Buildings*. 2024.
- 72.Zhou H., et al. Digital twin for district heating networks: Hydraulic resistance identification and operational forecasting // *Energy*. 2023.
- 73.Ганжа А. М., Марченко Н. А., Підкопай В. М., Нємцев Е. М. Моделювання процесів передачі теплоти від котельні до житлового масиву на основі гідравлічних розрахунків складної теплової мережі // *Вісник НТУ «ХП»*. – 2017. – № 22.
- 74.Степаненко В. С., Шевченко М. В. Основи гідравлічного розрахунку систем теплопостачання : навч. посібник. Київ : КНУБА, 2021. 126 с.
- 75.Кошелева О. В., Лисенко Л. І. Енергоефективна система теплопостачання 23-поверхового офісно-житлового комплексу //

- Матеріали 9-ї міжнар. наук.-практ. студентської конф. – Харків : НТУ «ХП», 2015. – С. 138.
76. Zimmerman N., Kyprianidis K., Lindberg C.-F. Achieving lower district heating network temperatures using feed-forward MPC // *Materials*. – 2019. – Vol. 12, № 15. – Art. 2465. – DOI: 10.3390/ma12152465.
77. Климчук О. А., Денисова А. Є., Баласанян Г. А. Комплексний підхід до впровадження переривчастого теплопостачання в будівлях громадського призначення // *Вісник НТУ «ХП»*. – 2017. – № 41.
78. Quaggiotto D., Vivian J., Zarrella A. Management of a district heating network using model predictive control with and without thermal storage // *Optimization and Engineering*. – 2021. – Vol. 22. – P. 1897–1919. – DOI: 10.1007/s11081-021-09644-w.
79. HERZ. Dynamic Control and Regulating Valves – Product Brochure. URL: <https://herz.ro> (дата звернення: 01.12.2025).
80. Oventrop. Automatic hydronic balancing with “Q-Tech”. URL: <https://www.ventrop.com> (дата звернення: 01.12.2025).
81. Радько І. П., Наливайко В. А., Міщенко А. В., Окушко О. В., Антипов Є. О. Регулювання подачі теплоносіїв як засіб підвищення енергоефективності // *Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті : матеріали XX міжнар. наук.-практ. конф.* – Київ, 2019. – С. 259–262.
82. Lyons B., O’Dwyer E., Shah N. Model reduction for model predictive control of district and communal heating systems within cooperative energy systems // *Energy*. – 2020. – Vol. 197. – Art. 117178. – DOI: 10.1016/j.energy.2020.117178.
83. Мотко М. П., Лисенко Л. І. Аналіз доцільності децентралізації теплопостачання багатоквартирних житлових будинків // *Матеріали XI міжнар. наук.-практ. конф. магістрантів та аспірантів.* – Харків : НТУ «ХП», 2017. – С. 131–132.

84. Schweiger G., Kuttin F., Posch A. District heating systems: An analysis of strengths, weaknesses, opportunities, and threats of the 4GDH // *Energies*. – 2019. – Vol. 12, № 24. – Art. 4748. – DOI: 10.3390/en12244748.
85. Zhao P., Yin J., Wang J. Performance Analysis of Control Valves for Supply–Demand Balance Regulation in Heating Stations // *Buildings*. 2025. Vol. 15, No. 10. Article 1624.
86. Danfoss. Комбінований регулювальний клапан AFQMP 2 : технічний опис. Danfoss Ukraine, 2021. 10 с.
87. Енергетична стратегія України на період до 2035 року: Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність. Київ : Кабінет Міністрів України, 2017. 53 с.
88. Про схвалення Енергетичної стратегії України на період до 2050 року : Розпорядження Кабінету Міністрів України від 21.04.2023 № 373-р [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/go/373-2023-%D1%80> (дата звернення: 02.02.2026).
89. Федірко М. М., Брич В. Я., Подобайло В. І., Клендій П. Б., Камишлов В. Г. Підходи до формування структури та потенціалу гібридної системи електропостачання котельних централізованого теплопостачання // *Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит*. – 2025. – № 9. – DOI: 10.20998/2313-8890.2025.09.10.
90. DemoUkraineDH has contributed to the modernisation of district heating systems in several Ukrainian cities (22.12.2021) [Electronic resource]. – NEFCO. – Mode of access: <https://www.nefco.int/news/demoukrainadh-has-contributed-to-the-modernisation-of-district-heating-systems-in-several-ukrainian-cities/> (accessed: 02.02.2026).
91. Agner F., Kergus P., Pates R., Rantzer A. Combating district heating bottlenecks using load control // *Smart Energy*. – 2022. – Vol. 6. – Art. 100067. – DOI: 10.1016/j.segy.2022.100067.

92. Krug R., Mehrmann V., Schmidt M. Nonlinear optimization of district heating networks // Optimization and Engineering. – 2021. – Vol. 22. – P. 783–819. – DOI: 10.1007/s11081-020-09549-0.
93. Rein M., Mohring J., Damm T., Klar A. Model order reduction of hyperbolic systems on the example of district heating networks [Electronic resource]. – arXiv:1903.03342, 2019. – URL: <https://arxiv.org/abs/1903.03342> (дата звернення: 02.02.2026).
94. Rein M., Mohring J., Damm T., Klar A. Optimal control of district heating networks using a reduced order model [Electronic resource]. – arXiv:1907.05255, 2019. – URL: <https://arxiv.org/abs/1907.05255> (дата звернення: 02.02.2026).
95. EN 15316-4-5:2017. Energy performance of buildings. Method for calculation of system energy requirements and system efficiencies. Part 4-5: District heating and cooling. – Brussels : CEN, 2017. – URL: <https://standards.globalspec.com/std/10218493/en-15316-4-5> (дата звернення: 02.02.2026).
96. ISO 52000-1:2017. Energy performance of buildings — Overarching EPB assessment — Part 1: General framework and procedures. – Geneva : International Organization for Standardization, 2017. – 128 p. – URL: <https://www.iso.org/standard/65601.html> (дата звернення: 02.02.2026).
97. Г. А. Баласанян, В. І. Ляшенко. Пріоритетне регулювання систем тепlopостачання з урахуванням гідравлічного балансування. Праці Одеського політехнічного університету. 2(72) (Жов 2025), 36-46. <https://doi.org/10.15276/opu.2.72.2025.04>
98. Методика гідравлічного розрахунку теплової мережі. Геннадій Баласанян, Владислав Ляшенко. Матеріали II Міжнародної науково-практичної конференції 13-16 січня 2026 року. https://isg-konf.com/uk/development-of-new-technologies-and-their-impact-on-infrastructure/?utm_source=eSputnik-

- [promo&utm_medium=email&utm_campaign=UA-Sbornik_materialov_konferencii_dostupen&utm_content=3220089408](https://www.iso.org/standard/69426.html)
99. ISO 50001:2018. Energy management systems — Requirements with guidance for use. – Geneva : International Organization for Standardization, 2018. – URL: <https://www.iso.org/standard/69426.html> (дата звернення: 02.02.2026).
100. Г. Баласанян і В. Ляшенко, Сучасні методи регулювання міських систем теплопостачання в умовах дефіциту енергоресурсів, RET, vol 61, no 3, pp 284-290, Вер 2025. <https://doi.org/10.15673/ret.v61i3.3213>
101. Сучасні методи регулювання міських систем теплопостачання в умовах дефіциту енергоресурсів. Генадій Баласанян, Владислав Ляшенко. Матеріали XVII Міжнародної науково-практичної конференції 23-26 грудня 2025 року. стор. 102- 106). https://isg-konf.com/uk/development-of-science-through-the-latest-technologies-and-theories/?utm_source=eSputnik-promo&utm_medium=email&utm_campaign=UA-Sbornik_materialov_konferencii_dostupen&utm_content=3220089408
102. CIBSE. CP1: Heat networks: Code of Practice for the UK. – London : Chartered Institution of Building Services Engineers, 2021. – 229 p. – ISBN 978-1-912034-80-2. – URL: <https://www.cibse.org/knowledge-research/knowledge-portal/cp1-heat-networks-code-of-practice-for-the-uk-2020-pdf> (дата звернення: 02.02.2026).
103. Danfoss. Automatic balancing and control valves AFQ, AFQM, AFQMP: Technical documentation. Danfoss Heating Segment, 2020. 12 p
104. Г. Баласанян і В. Ляшенко, Моделювання режимів роботи регуляторів витрати теплоносія в умовах локальних теплових, RET, vol 61, no 4, Груд 2025. <https://doi.org/10.15673/ret.v61i4.3329>
105. Моделювання роботи регулюючого вузла AFPQMP у складі центрального. Генадій Баласанян, Владислав Ляшенко. Матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції 27-30 січня 2026 року.

- https://isg-konf.com/uk/implementation-of-modern-technologies-and-their-impact-on-industry/?utm_source=eSputnik-promo&utm_medium=email&utm_campaign=UA-Sbornik_materialov_konferencii_dostupen&utm_content=3220089408
106. Danfoss. Регулятори перепаду тиску AFP 2: Технічний опис. Danfoss Ukraine, 2020. 6 с.
107. Danfoss. Сідельні регулювальні клапани VFG 2, VFG 21: Технічний опис. Danfoss Ukraine, 2020. 6 с.
108. Danfoss. AME, AMEi electronic actuators: Technical documentation. Danfoss Heating Segment, 2021. 10 p.
109. Danfoss. Combined solutions for district energy substations: Technical catalogue. Danfoss District Energy, 2023. 28 p
110. Euroheat & Power. Good practice guide: district energy [Electronic resource]. – Brussels, 2018. – Available at: <https://www.euroheat.org/dhc/knowledge-hub/good-practice-guide-district-energy> (accessed: 06.02.2026).
111. Г. Баласанян і В. Ляшенко, Методика розрахунку та проектування індивідуальних теплових пунктів при реконструкції елеваторних вузлів, *RET*, vol 62, no 1, Бер 2026. <https://doi.org/10.15673/ret.v62i1.3388>
112. IEA Technology Collaboration Programme on District Heating and Cooling (IEA DHC). Annex XII: System integration and operation of district heating and cooling systems [Electronic resource]. – Paris, 2020. – Available at: <https://www.iea-dhc.org/the-research/annexes/annex-xii> (accessed: 06.02.2026).
113. SS-EN 13941-1:2019. District heating pipes – Design and installation of thermal insulated bonded pipe systems for directly buried hot water networks. Part 1: Design. – Stockholm : Swedish Institute for Standards, 2019.

114. Проценко С. Б., Новицька О. С., Ковальчук В. П. Порівняльний аналіз розрахунку проектного теплового навантаження систем опалення будівель за європейською та вітчизняною методиками (на прикладі житлового будинку в м. Рівне) // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія: Теорія і практика будівництва. – 2016. – № 844. – С. 169–179.
115. Проценко С. Б., Новицька О. С., Ковальчук В. П. Розрахунок проектного теплового навантаження систем опалення будівель за європейською та вітчизняною методиками // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. – 2017. – С. 133–139.
116. ДСТУ EN 13941:2016. Проектування та будівництво попередньо ізольованих систем трубопроводів із нерухомою ізоляцією для розподільчих мереж тепlopостачання. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016.
117. Проценко С. Б., Новицька О. С., Кізеєв М. Д. Особливості нової методики розрахунку проектного теплового навантаження систем опалення будівель за ДСТУ EN 12831-1:2017 // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. – 2019. – Т. 25, № 2. – С. 140–144. – DOI: 10.31649/2311-1429-2018-2-140-144.
118. Ніколаєва А. Р., Куценко О. С. Синтез оптимального регулятора теплового стану будинків з індивідуальним тепловим пунктом // Матеріали XII Міжнар. наук.-практ. конф. магістрантів та аспірантів (17–20 квітня 2018 р.). – Харків : НТУ «ХПІ», 2018. – Ч. 1. – С. 100–101.
119. ДСТУ EN 253:2016. Розподільчі мережі опалення. Попередньо ізольовані трубопровідні системи для підземного прокладання. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016.
120. Проценко С. Б., Новицька О. С. Аналіз нових нормативних вимог до розрахунку проектного теплового навантаження систем опалення будівель // Вісник НУВГП. Технічні науки. – 2015. – Вип. 3 (71). – Ч. 2. – С. 17–24.

121. ДСТУ EN 12831-1:2017. Енергоефективність будівель. Метод розрахунку проектного теплового навантаження. Частина 1. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2017.
122. Wang Y., You S., Zhang H., Zheng X., Wei S., Miao Q., Zheng W. Operation stability analysis of district heating substation from the control perspective // *Energy and Buildings*. – 2017. – Vol. 154. – P. 373–390. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.08.034>.
123. Danfoss. Pressure independent balancing control valves (PICV) [Electronic resource]. – 2025. – Available at: <https://www.danfoss.com/en/products/dhs/valves/hydronic-balancing-and-control/pressure-independent-balancing-control-valves-pibcv/> (accessed: 06.02.2026).
124. Naldi C., Dongellini M., Morini G. L., di Schio E. R. The adoption of pressure independent control valves for simultaneous optimization of energy consumption and comfort in buildings // *Energy and Buildings*. – 2023. – Vol. 287. – Art. 112969. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.112969>.
125. Lazarević S. L., Čongradac V. D., Anđelković A. S., Kljajić M. V., Kanović Ž. S. District heating substation elements modeling for the development of the real-time model // *Thermal Science*. – 2019. – Vol. 23, No. 3. – P. 2061–2070. – DOI: <https://doi.org/10.2298/TSCI181226031L>.
126. Danfoss. ECL Comfort controllers: weather compensated temperature controllers for district heating [Electronic resource]. – 2024. – Available at: <https://www.danfoss.com/en/products/electronic-controls/dhs/electronic-controllers-and-application-keys/ecl-controllers/> (accessed: 06.02.2026).
127. Vandermeulen A., Van Oevelen T., van der Heijde B., Helsen L. Simulation-based evaluation of substation models for network flexibility characterisation in district heating networks // *Energy*. – 2020. – Vol. 201. – Art. 117650. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117650>.

128. CEN. EN 13941-1:2019. District heating pipes. Part 1: Design. – Brussels : European Committee for Standardization, 2019.
129. CEN. EN 13941-2:2019. District heating pipes. Part 2: Installation. – Brussels : European Committee for Standardization, 2019.
130. Tol H. Í. Development of a physical hydraulic modelling tool for district heating systems // Energy and Buildings. – 2021. – Vol. 253. – Art. 111512. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111512>.

ДОДАТОК А**СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Г. Баласанян і В. Ляшенко, Сучасні методи регулювання міських систем теплопостачання в умовах дефіциту енергоресурсів, RET, vol 61, no 3, pp 284-290, Вер 2025.

<https://doi.org/10.15673/ret.v61i3.3213>

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

2. Г. А. Баласанян, В. І. Ляшенко. Пріоритетне регулювання систем теплопостачання з урахуванням гідравлічного балансування. Праці Одеського політехнічного університету 2(72) (Жов 2025), 36-46.

<https://doi.org/10.15276/opu.2.72.2025.04>

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

3. Г. Баласанян і В. Ляшенко, Моделювання режимів роботи регуляторів витрати теплоносія в умовах локальних теплових, RET, vol 61, no 4, Груд 2025.

<https://doi.org/10.15673/ret.v61i4.3329>

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

4. Г. Баласанян і В. Ляшенко, Методика розрахунку та проєктування індивідуальних теплових пунктів при реконструкції елеваторних вузлів, RET, vol 62, no 1, Груд 2026.

<https://doi.org/10.15673/ret.v62i1.3388>

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

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

5. Баласанян Г. А., Крапива Н. В., Семеній А. А., Саченко Л. В., Ляшенко В. І. «Оптимізація параметрів та режимів роботи бака-акумулятора тепла системи 10 електричного опалення в переривчатому режимі».

Міжнародна наукова конференція «Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення (випуск 80)», Польща, 19-20 вересня 2023. С. 177-182.

<http://www.konferenciaonline.org.ua/ua/article/id-1275/>

6. Генадій Баласанян, Артем Остапенко, Владислав Ляшенко. «Узгодження графіків електричного і теплового навантаження комбінованої системи енергозабезпечення». Сучасні технології біомедичної інженерії. III МНТК, 08-10 травня 2024 р., Нац. ун-т «Одеська політехніка». С. 271-273

<https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/book/830>

7. Генадій Баласанян, Артем Остапенко, Владислав Ляшенко. «Комбінованих систем енергозабезпечення на базі газотурбінної когенераційної установки та вітрогенератора». Матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції «Old and new technologies of learning development in modern conditions», 13-16 лютого 2024 р., Берлін, Німеччина. С. 297-301

<https://isg-konf.com/old-and-new-technologies-of-learning-development-in-modern-conditions/>

8. Генадій Баласанян, Владислав Ляшенко. «Сучасні методи регулювання міських систем теплопостачання в умовах дефіциту енергоресурсів». Матеріали XVII Міжнародної науково-практичної конференції «Development of science through the latest technologies and theories» 23-26 грудня 2025 р., Мілан, Італія. С. 102-106.

<https://isg-konf.com/development-of-science-through-the-latest-technologies-and-theories/>

9. Генадій Баласанян, Владислав Ляшенко. «Методика гідравлічного розрахунку теплової мережі». Матеріали II Міжнародної науково-практичної конференції «Development of new technologies and their impact on infrastructure», 13-16 січня 2026 р., Краків, Польща. С. 47-50.

<https://isg-konf.com/development-of-new-technologies-and-their-impact-on-infrastructure/>

10. Генадій Баласанян, Владислав Ляшенко. «Модельовання роботи регулюючого вузла АFRQMP у складі центрального теплового пункту». Матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції «Implementation of modern technologies and their impact on industry», 27-30 січня 2026 р., Париж, Франція. С. 42-48.

<https://isg-konf.com/implementation-of-modern-technologies-and-their-impact-on-industry/>

ДОДАТОК Б

Таблиця Б.1

Коефіцієнти місцевих гідравлічних опорів

Позначення	Тип опору	ξ
З	Засувка відкрита	0,5
Зв	Плавне звуження	0,1
Р	Плавне розширення	0,5
ТР-п	Трійник на прохід	1
ТР-р	Трійник на відгалуження	1,5
Кр-п	Хрестовина на прохід	2
КР-о	Хрестовина на відгалуження	3
П30°	Поворот 30°	0,5
П60°	Поворот 60°	0,8
П90°	Поворот 90°	1

ДОДАТОК В

Таблиця В.1

Гідравлічний розрахунок ділянок трубопроводу

Ділянка, №	Внутрішній діаметр, D _{вн} , мм	Довжина ділянки, м	Витрата теплоносія, м³/год	Швидкість теплоносія, м/с	В-т заорозкованості, мм	Питома лінійна втрата, м вод. ст./м	Лейні втрати на ділянці, м вод. ст.	Кількість місцевих гідрравлічних опорів на ділянці та їх тип										Сума коефіцієнтів гідрравлічного опору (місцеві), Σξ	Місцеві втрати, м вод. ст.	Сума лінійних та місцевих втрат, м вод. ст.	Врати тиску теплоносія наприкінці ділянки початковому з нулем швидкості, м вод. ст.
								З	За*	Р*	Тр-п	Тр-ф	Кр-п	Кр-ф	ПЗГ	ПЦГ	РЮ*				
3й квартал																					
1	250	90	79,42	1,240	2	0,020	1,884	1	0	0	0	0	0	0	0	0	2,5	0,199	2,102	2,182	
2	150	17	43,16	0,679	2	0,066	0,199	1	0	0	1	0	0	0	0	0	3,5	0,015	0,234	2,437	
3	150	68	43,16	0,679	2	0,066	0,797	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2,0	0,047	0,844	1,261	
4	250	118	36,05	0,567	2	0,064	0,964	0	0	0	1	0	0	0	1	0	7	0,139	1,104	4,364	
5	150	87	27,52	0,433	2	0,092	0,434	0	0	0	1	0	0	0	0	0	2	0,029	0,463	4,887	
6	70	15,5	8,33	0,402	2	0,012	0,609	1	2	0	0	1	0	0	0	0	2,2	0,041	0,649	5,457	
7	150	2	19,28	0,302	2	0,061	0,005	0	0	0	2	0	0	0	0	0	3,0	0,005	0,009	4,816	
8	100	1	13,42	0,476	2	0,095	0,638	1	2	0	0	1	0	0	0	0	2,2	0,025	0,054	4,070	
9	125	16,8	13,42	0,304	2	0,061	0,480	1	0	1	0	0	0	0	1	0	3	0,028	0,306	1,378	
10	100	52	36,26	1,383	2	0,015	1,634	1	2	0	0	1	0	0	2	0	3,2	0,260	3,962	4,185	
11	100	20	29,43	1,241	2	0,021	0,836	0	0	0	2	0	0	0	0	0	3,0	0,036	0,971	2,006	
12	80	71	18,27	1,010	2	0,029	4,640	1	1	0	1	0	0	0	0	0	4	0,06	4,332	11,367	
13	50	8	7,11	1,907	2	0,061	0,834	1	3	0	0	1	0	0	0	0	2,3	0,119	0,910	4,194	
14	50	8,5	8,51	1,207	2	0,071	1,244	2	3	0	0	1	0	0	0	0	2	4,8	0,267	1,801	3,965
15	70	47,5	8,33	0,602	2	0,012	1,134	1	0	0	0	0	0	0	0	1	5,5	0,008	1,162	6,638	
16	110	40,9	13,41	0,478	2	0,095	0,385	2	1	0	0	0	0	0	0	0	4	0,020	0,845	1,819	
17	80	80	5,78	0,330	2	0,069	0,436	1	2	0	1	0	0	0	0	0	2	0,019	0,475	1,291	
18	70	1	5,81	0,493	2	0,068	0,036	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	2,1	0,006	0,042	4,107
19	80	94	11,16	0,617	2	0,021	1,348	2	1	0	0	1	0	0	0	0	1	3,8	0,070	1,218	4,251
20	80	159	6,67	0,325	2	0,061	0,998	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	10,6	0,061	1,059	12,426
21	70	10	12,20	0,881	2	0,026	0,512	2	1	0	0	1	0	0	0	0	3	0,222	0,733	12,101	

ДОДАТОК Г

Таблиця Г.1

Статичний напір для споживачів ЦТП – 27

№	Адреса	Гідравлічний опір м.вод.ст.	Об'ємна витрата м ³ /год	h _{geo} , Абсолютна відм., м	Поверховість	h _{build} , висота спорудж. м	H _{stat} , статичний напір споживача
1	ЗАХИСНИКІВ УКРАЇНИ 10	7,97	8,53	16	5	15	16
2	ЗАХИСНИКІВ УКРАЇНИ 10-Б	10,25	11,16	17	5	15	17
3	ЗАХИСНИКІВ УКРАЇНИ 8	7,29	5,78	15	5	15	15
4	ЗАХИСНИКІВ УКРАЇНИ 8-А	7,82	13,41	18	9	27	30
5	ЗАХИСНИКІВ УКРАЇНИ 8-Б (КД	14,43	6,07	18	3	9	12
6	ЗАХИСНИКІВ УКРАЇНИ 8-С (ЗД	8,62	8,33	20	2	6	11
7	ПРОСПЕКТ МИРУ 17-А (Чорно	14,10	12,20	20	3	9	14
8	ПРОСПЕКТ МИРУ 27	8,11	6,83	18	5	15	18
9	ПРОСПЕКТ МИРУ 29	6,19	7,11	18	5	15	18

ДОДАТОК Д

Таблиця Д.1

Результати пріоритетного розподілу теплоти
без застосування сценарію дефіциту

№	Адреса	Class	Q_design	W_class	K_min	K_def	L_j	S_j	N_j	K_raw	K_final	Q_deliv
1	ЗАХИСНИКІВ УКРАЇНИ 10	C	301,22	0,8	0,5	1,0	1,000	0,800	0,800	0,800	1,000	301
2	ЗАХИСНИКІВ УКРАЇНИ 10-Б	C	389,49	0,8	0,5	1,0	1,000	0,800	0,800	0,800	1,000	389
3	ЗАХИСНИКІВ УКРАЇНИ 8	C	201,66	0,8	0,5	1,0	1,000	0,800	0,800	0,800	1,000	202
4	ЗАХИСНИКІВ УКРАЇНИ 8-А	C	467,76	0,8	0,5	1,0	1,000	0,800	0,800	0,800	1,000	468
5	ЗАХИСНИКІВ УКРАЇНИ 8-Б (Ж)	A	211,67	1,0	0,7	1,0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	212
6	ЗАХИСНИКІВ УКРАЇНИ 8-С (З)	A	290,75	1,0	0,7	1,0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	291
7	ПРОСПЕКТ МИРУ 17-А (Чорн)	A	425,66	1,0	0,7	1,0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	426
8	ПРОСПЕКТ МИРУ 27	C	238,30	0,8	0,5	1,0	1,000	0,800	0,800	0,800	1,000	238
9	ПРОСПЕКТ МИРУ 29	C	248,18	0,8	0,5	1,0	1,000	0,800	0,800	0,800	1,000	248
10	Теоретичний спож. 1	D	700,00	0,6	0,4	1,0	1,000	0,600	0,600	0,600	1,000	700
11	Теоретичний спож. 2	E	1200,00	0,4	0,3	1,0	1,000	0,400	0,400	0,400	1,000	1200

Таблиця Д.2

Результати пріоритетного розподілу теплоти за сценарію дефіциту в 10%

№	Адреса	Class	Q_design	W_class	K_min	K_def	L_j	S_j	N_j	K_raw	K_final	Q_deliv
1	ЗАХИСНИКІВ УКРАЇНИ 10	C	301,22	0,8	0,5	0,9	0,701	0,561	0,561	0,505	0,893	269
2	ЗАХИСНИКІВ УКРАЇНИ 10-Б	C	389,49	0,8	0,5	0,9	0,650	0,520	0,520	0,500	0,892	347
3	ЗАХИСНИКІВ УКРАЇНИ 8	C	201,66	0,8	0,5	0,9	0,773	0,618	0,618	0,556	0,904	182
4	ЗАХИСНИКІВ УКРАЇНИ 8-А	C	467,76	0,8	0,5	0,9	0,611	0,489	0,489	0,500	0,892	417
5	ЗАХИСНИКІВ УКРАЇНИ 8-Б (Ж)	A	211,67	1,0	0,7	1,0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	212
6	ЗАХИСНИКІВ УКРАЇНИ 8-С (З)	A	290,75	1,0	0,7	1,0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	291
7	ПРОСПЕКТ МИРУ 17-А (Чорн)	A	425,66	1,0	0,7	1,0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	426
8	ПРОСПЕКТ МИРУ 27	C	238,30	0,8	0,5	0,9	0,744	0,595	0,595	0,536	0,899	214
9	ПРОСПЕКТ МИРУ 29	C	248,18	0,8	0,5	0,9	0,737	0,590	0,590	0,531	0,898	223
10	Теоретичний спож. 1	D	700,00	0,6	0,4	0,8	0,524	0,315	0,315	0,400	0,870	609
11	Теоретичний спож. 2	E	1200,00	0,4	0,3	0,7	0,411	0,164	0,164	0,300	0,848	1018

Таблиця Д.3

Результати пріоритетного розподілу теплоти за сценарію дефіциту в 20%

№	Адреса	Class	Q_design	W_class	K_min	K_def	L_j	S_j	N_j	K_raw	K_final	Q_deliv
1	ЗАХИСНИКІВ УКРАЇНИ 10	C	301,22	0,8	0,5	0,8	0,701	0,561	0,733	0,586	0,823	248
2	ЗАХИСНИКІВ УКРАЇНИ 10-Б	C	389,49	0,8	0,5	0,8	0,650	0,520	0,679	0,544	0,805	313
3	ЗАХИСНИКІВ УКРАЇНИ 8	C	201,66	0,8	0,5	0,8	0,773	0,618	0,808	0,647	0,849	171
4	ЗАХИСНИКІВ УКРАЇНИ 8-А	C	467,76	0,8	0,5	0,8	0,611	0,489	0,639	0,511	0,791	370
5	ЗАХИСНИКІВ УКРАЇНИ 8-Б (Ж)	A	211,67	1,0	0,7	1,0	0,765	0,765	1,000	0,950	0,979	207
6	ЗАХИСНИКІВ УКРАЇНИ 8-С (З)	A	290,75	1,0	0,7	1,0	0,708	0,708	0,925	0,879	0,948	276
7	ПРОСПЕКТ МИРУ 17-А (Чорн)	A	425,66	1,0	0,7	1,0	0,631	0,631	0,825	0,784	0,908	386
8	ПРОСПЕКТ МИРУ 27	C	238,30	0,8	0,5	0,8	0,744	0,595	0,779	0,623	0,839	200
9	ПРОСПЕКТ МИРУ 29	C	248,18	0,8	0,5	0,8	0,737	0,590	0,771	0,617	0,836	207
10	Теоретичний спож. 1	D	700,00	0,6	0,4	0,7	0,524	0,315	0,411	0,400	0,743	520
11	Теоретичний спож. 2	E	1200,00	0,4	0,3	0,5	0,411	0,164	0,215	0,300	0,700	841

Таблиця Д.4

Результати пріоритетного розподілу теплоти за сценарію дефіциту в 30%

№	Адреса	Class	Q_design	W_class	K_min	K_def	L_j	S_j	N_j	K_raw	K_final	Q_deliv
1	ЗАХИСНИКІВ УКРАЇНИ 10	C	301,22	0,8	0,5	0,7	0,701	0,561	0,733	0,500	0,702	212
2	ЗАХИСНИКІВ УКРАЇНИ 10-Б	C	389,49	0,8	0,5	0,7	0,650	0,520	0,679	0,500	0,702	274
3	ЗАХИСНИКІВ УКРАЇНИ 8	C	201,66	0,8	0,5	0,7	0,773	0,618	0,808	0,525	0,738	145
4	ЗАХИСНИКІВ УКРАЇНИ 8-А	C	467,76	0,8	0,5	0,7	0,611	0,489	0,639	0,500	0,702	329
5	ЗАХИСНИКІВ УКРАЇНИ 8-Б (Ж)	A	211,67	1,0	0,7	0,9	0,765	0,765	1,000	0,900	0,940	199
6	ЗАХИСНИКІВ УКРАЇНИ 8-С (З)	A	290,75	1,0	0,7	0,9	0,708	0,708	0,925	0,833	0,900	262
7	ПРОСПЕКТ МИРУ 17-А (Чорн)	A	425,66	1,0	0,7	0,9	0,631	0,631	0,825	0,743	0,847	360
8	ПРОСПЕКТ МИРУ 27	C	238,30	0,8	0,5	0,7	0,744	0,595	0,779	0,506	0,706	168
9	ПРОСПЕКТ МИРУ 29	C	248,18	0,8	0,5	0,7	0,737	0,590	0,771	0,501	0,703	174
10	Теоретичний спож. 1	D	700,00	0,6	0,4	0,5	0,524	0,315	0,411	0,400	0,643	450
11	Теоретичний спож. 2	E	1200,00	0,4	0,3	0,3	0,411	0,164	0,215	0,300	0,583	700

ДОДАТОК Е

Таблиця Е.1

Результати розрахунків режимів роботи елеваторного вузла при змінному перепаді тиску для споживача за адресою «Данченка 3»

Напор на ввіді, м вод.ст.	Надлишок напору, м вод.ст.	Фактична витрата через сопло, м ³ /год	Коефіцієнт зміння	Фактична витрата тепловосія в систему опалення, м ³ /год	Температура тепловосія після елеватора, °С	Статус роботи	Теплова потужність, кВт	Забезпеченість тепlopостачання, %
5	-11,13	0,00	0,00	0,00	0,00	НЕПРАЦЮЄ	0,00	0,00
10	-6,13	0,00	0,00	0,00	0,00	НЕПРАЦЮЄ	0,00	0,00
15	-1,13	0,00	0,00	0,00	0,00	НЕПРАЦЮЄ	0,00	0,00
20	3,87	2,58	0,44	3,72	112	ПРАЦЮЄ	80	15,46
25	8,87	3,91	0,86	7,26	102	ПРАЦЮЄ	234	45,43
30	13,87	4,88	1,23	10,87	97	ПРАЦЮЄ	418	81,23
35	18,87	5,70	1,57	14,63	93	ПРАЦЮЄ	624	121,20
40	23,87	6,41	1,89	18,54	91	ПРАЦЮЄ	846	164,51
45	28,87	7,05	2,20	22,58	89	ПРАЦЮЄ	1084	210,64
50	33,87	7,63	2,50	26,75	87	ПРАЦЮЄ	1334	259,25

ДОДАТОК Є

ЕЛЕМЕНТИ В СКЛАДІ АВТОМАТИЗОВАНОГО ІТП

ВИХІДНІ ДАНІ	Сторона 1	Сторона 2	ОДН.
Потужність		368.0	kW
TLog		15.4	°C
Мін. запас поверхні		10.00	%
Рідина	Вода	Вода	
Темп. на вході	130.0	65.0	°C
Вихідна темп.	70.0	95.0	°C
Масова витрата	1.46	2.93	kg/s
Вхід об'ємна витрата	5.61	10.77	m ³ /h
Вихідна об'ємна витрата	5.37	10.97	m ³ /h
Макс. падіння тиску	30.0	30.0	kPa
ТЕПЛОБМІННИК	Сторона 1	Сторона 2	ОДН.
Площа обміну тепла		3.6	m ²
Коеф. забруднення		0.01936534	m ² /K/kW
К чисте		7497.9	W/m ² K
К забруд.		6547.3	W/m ² K
Запас площі		14.5	%
Розрах. падіння тиску	7.0	27.0	kPa
Швидкість в з'єднаннях	1.89	3.75	m/s
Швидкість в пристрої	0.13	0.25	m/s
Число Рейнольдса	1746	2745	
Альфа	14906.0	22217.5	W/m ² K
ФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ	Сторона 1	Сторона 2	ОДН.
Рідина	Вода	Вода	
Референтна темп.	100.0	80.0	°C
Щільність	958.79	971.50	kg/m ³
Питома теплоємність	4.21	4.18	kJ/kgK
Теплопровідність	0.681	0.670	W/mK
В'язкість дин.	0.0003	0.0004	Ns/m ²
Число Прандтля	1.74	2.21	

Рисунок Є.1 – Технічний паспорт теплообмінного апарату

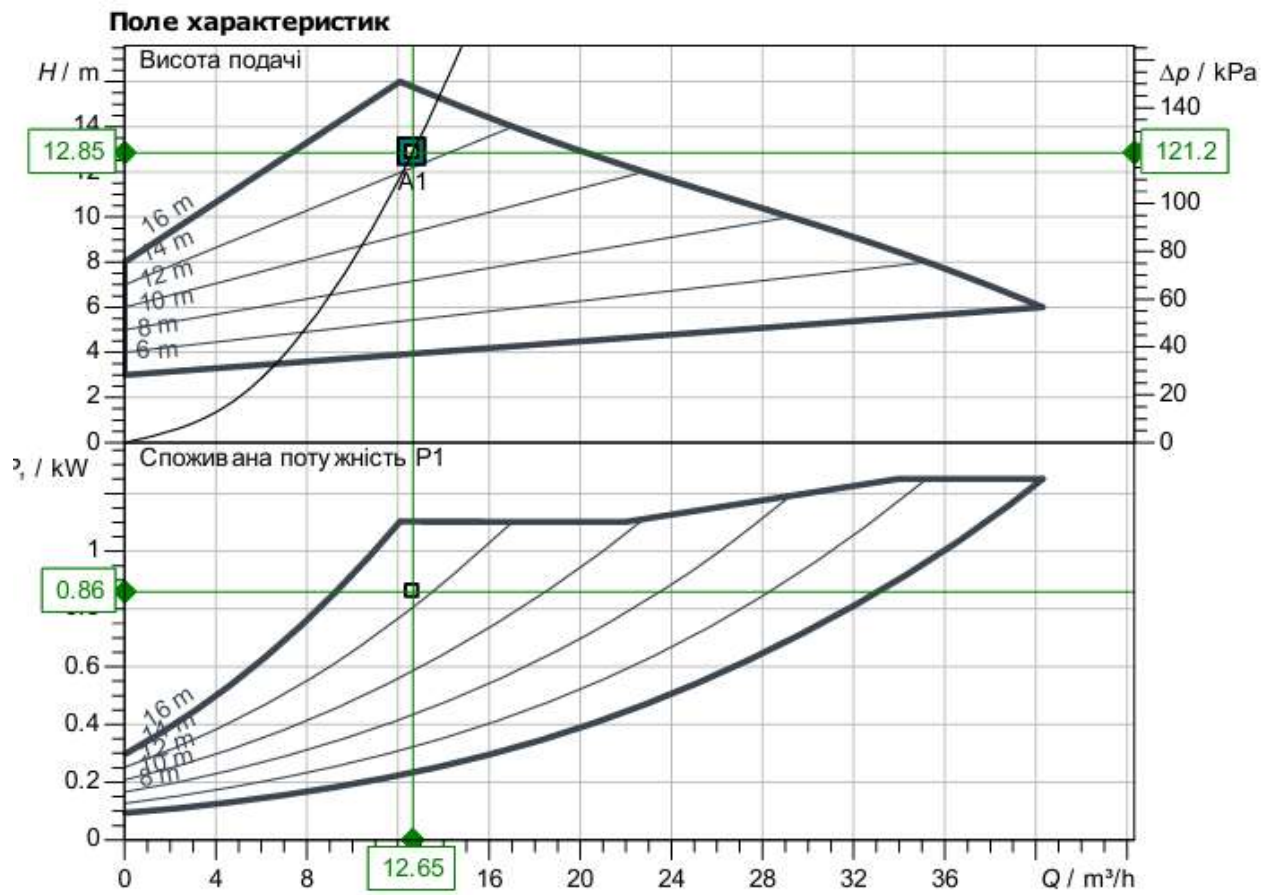


Рисунок Є.2 – Характеристика циркуляційного насоса

Специфікація виробів та матеріалів автоматизованого ІТП

Поз.	Найменування і технічна характеристика	Од. вим.	Кількість, шт.
1	2	3	4
Обладнання			
1	Регулюючий клапан в комплекті:	шт.	1
	- 2-х ходовий клапан DN32, VFG 2	-	
	- Регулювальний елемент AFP 2	-	
	- Перехідний адаптер для підключення FVG 2 + AFP 2	-	
	- Електро-привід 230В, АМЕі 6 iNET	-	
2	Теплообмінник паяний Q=368кВт, Dn32	шт.	1
3	Циркуляційний насос Dn50	шт.	2
4	Тепловий лічильник Dn50, G=60м3	шт.	1
5	Лічильник води підживлювальної води DN15	шт.	1
6	Автоматичний клапан підживлення G1/2"	шт.	1
7	Розширювальний бак V=150л, 10 бар	шт.	1
8	Запобіжний клапан регулюючий Ду20	шт.	3
9	Щит автоматики	шт.	1
Арматура			
10	Антивібраційна вставка, Ду50	шт.	2
11	Фільтр осадовий фланцевий, Ду50, PN16	шт.	3
12	Фільтр осадовий муфтовий, Ду20	шт.	1
13	Клапан зворотній міжфланцевий, Ду50	шт.	2
14	Клапан зворотній муфтовий, Ду20	шт.	1
15	Засівка типу батерфляй Ду 50	шт.	7
16	Кран кульовий муфтовий, Ду20, різьба 3В	шт.	5
17	Кран кульовий муфтовий, Ду15, різьба 3В	шт.	10
18	Кран манометричний Ду15	шт.	10
19	Клапан автоматичний повітровідвідний, Ду15	шт.	3
20	Манометр	шт.	10
21	Термометр	шт.	4
Матеріали			
	Труба сталевая електрозварна <u>прямошовна</u> Ду80	м	5
	Труба сталевая електрозварна <u>прямошовна</u> Ду50	м	4
	Труба сталевая водогазопровідна Ду32	м	1
	Труба сталевая водогазопровідна Ду25	м	3
	Відвід <u>крутовигнутий 90°</u> Ду80	шт.	4
	Відвід <u>крутовигнутий 90°</u> Ду50	шт.	8
	Відвід <u>крутовигнутий 90°</u> Ду32	шт.	1
	Відвід <u>крутовигнутий 90°</u> Ду20	шт.	6
	Коліно гнута 90° Ду15	шт.	9
	Перехід концентричний Ду80х50	шт.	3
	Перехід концентричний Ду50х32	шт.	4
	Заглушка Ду80	шт.	1
	Фланець сталевий плоский Ду 50, PN 16	шт.	6
	Фланець сталевий плоский Ду 50, PN 10	шт.	32

Таблиця Є.1 (Закінчення)

Фланець сталевий плоский Ду 32, PN 16	шт.	2
Прокладка ущільнююча Ду50, 106x57x2	шт.	38
Прокладка ущільнююча Ду32, 81x38x2	шт.	2
Муфта під приварку G3/4"	шт.	13
Різьба під приварку G1 1/4"	шт.	4
Різьба під приварку G3/4"	шт.	6
Різьба під приварку G1/2"	шт.	15
Фітинги латунь		
Футорка 1 1/4" x 1/2"	шт.	4
Футорка 1" x 3/4"	шт.	1
Кутник різьба ВВ 1"	шт.	1
Кутник різьба ВЗ 3/4"	шт.	3
Кутник різьба ВЗ 1/2"	шт.	1
Трійник різьба ВВВ 1 1/4"	шт.	4
Трійник різьба ВЗВ 3/4"	шт.	1
Ніпель 1"x1/2"	шт.	1
Накидка гайка 3/4"x1/2"	шт.	4
Американка різьба ВЗ 1 1/4"	шт.	4
Американка різьба ВЗ 3/4"	шт.	1
Кріплення		
Швеллер №10	м	5
Профіль 40x40x3мм	м	12
Віброізолююче кріплення	шт.	4
Шпилька M12x1000	шт.	20
Болт M12x70	шт.	50
Гайка M12		200
Шайба M12		200
Витратні матеріали		
Круг відрізний прямий 125x1,2x22,23мм	шт.	10
Круг зачистний А24 125x6x22,23	шт.	10
Грунт-емаль по іржі Зв1 графіт - 2.8 кг	шт.	2
Розчиник Уайт-спірит 0,8л (530гр)	шт.	1
Краги зварювальні двошарові	шт.	1
Електроди Д=3мм тубус 2,5кг	кг	5
Льон,100 г, коса	шт.	1
Паста "UNIPAK", 250г	шт.	10

ДОДАТОК Ж

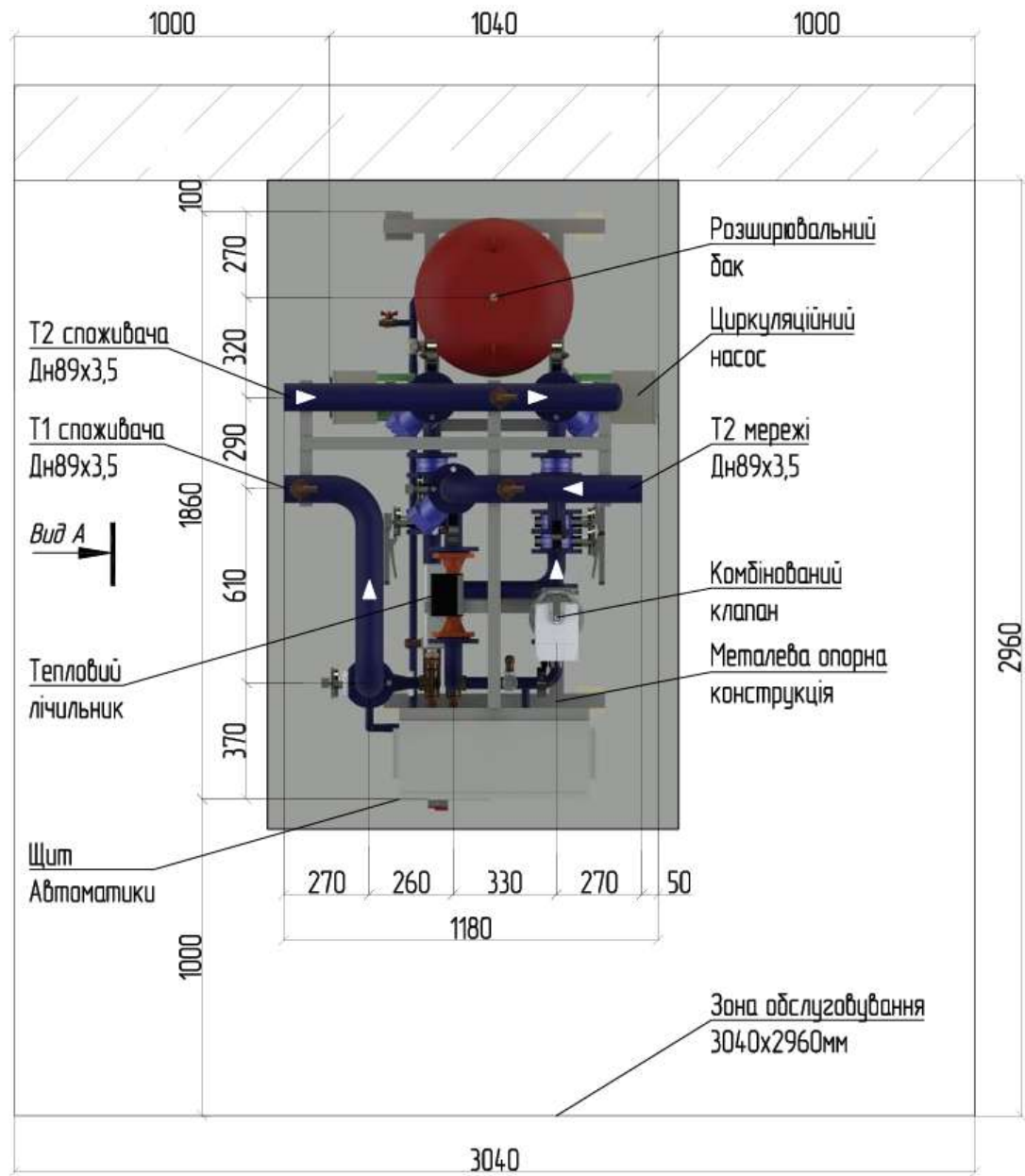


Рисунок Ж.1 – План розташування обладнання ІТІ

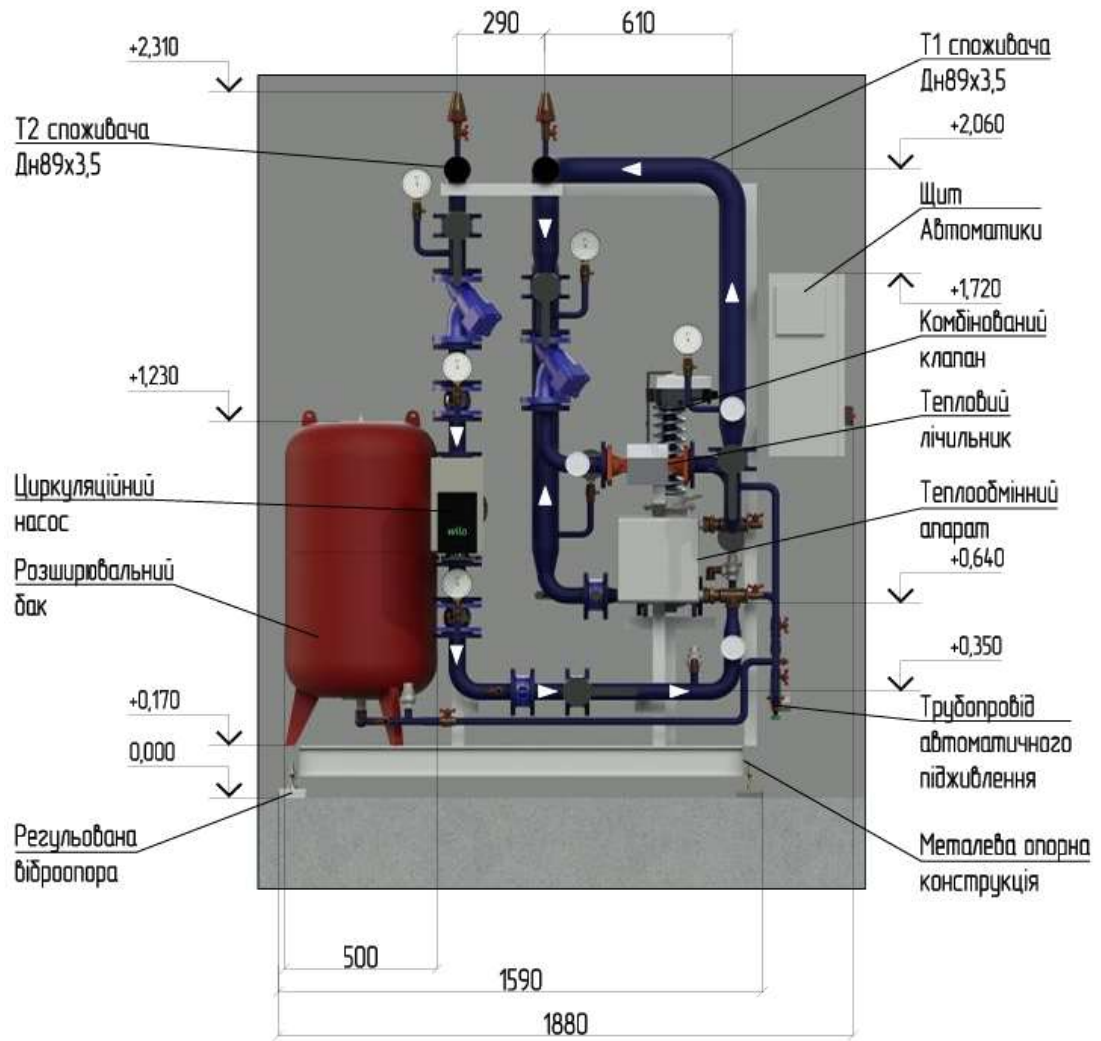


Рисунок Ж.2 – Вид А ІТП

ДОДАТОК 3**АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ**

Результатів дисертаційного дослідження аспіранта Національного університету «Одеська політехніка» Ляшенка Владислава Ігоровича на тему: «Ефективність міських систем тепlopостачання в умовах дефіциту енергоресурсів», представленої на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 144 – Теплоенергетика.

Розробки дисертаційної роботи використані ПП «КБ Теплоенерго» при виконанні проєктних рішень з модернізації системи централізованого тепlopостачання міста Чорноморськ.

Застосування результатів дисертаційної роботи у проєктній діяльності дозволило підвищити обґрунтованість технічних рішень при модернізації теплових мереж, забезпечити сумісність проєктованих теплових пунктів з розробленими алгоритмами автоматизованого та пріоритетного регулювання, знизити ризики гідравлічної нестабільності після реконструкції мереж, створити проєктну основу для подальшого впровадження SCADA-систем управління тепlopостачанням міста.

Результати дисертаційної роботи успішно впроваджені у практику проєктування, мають прикладний характер та використовуються ПП «КБ Теплоенерго» при виконанні робіт з модернізації системи тепlopостачання міста Чорноморськ.

Директор



П. А. Іщенко