

АНОТАЦІЯ

Баранчук К.О. Системи теплопостачання з енергоефективними двонаправленими тепловими пунктами. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія» (19 – Архітектура та будівництво). – Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, 2025 р.

Основний зміст дисертаційної роботи. У дисертаційній роботі досліджуються інноваційні рішення для централізованого теплопостачання на основі енергоефективних двонаправлених індивідуальних теплових пунктів (2Н-ІТП). Вступна частина підкреслює, що сучасні системи централізованого теплопостачання (ЦТ) переходять до моделей 4-го і 5-го поколінь із низькотемпературними мережами та високим вмістом відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). Особливу актуальність набувають ІТП, які не лише отримують тепло з мережі, а й передають надлишки тепла назад у мережу. Наукова новизна роботи полягає у формулюванні наукових засад побудови та експлуатації двонаправлених теплових пунктів, розробці нових схем і алгоритмів їх роботи. Практична значущість полягає в обґрунтуванні ефективності 2Н-ІТП для зниження теплових втрат, інтеграції локальних ВДЕ та підвищення гнучкості системи ЦТ. У роботі окреслено перспективні напрями розвитку сучасних цифрових платформ для моніторингу й управління 2Н-ІТП, що сприятиме подальшій автоматизації процесів, адаптивному керуванню та прогнозуванню теплових навантажень.

Дисертація містить оригінальні науково обґрунтовані розробки: нові схеми теплових пунктів, методики моделювання й управління 2Н-ІТП, експериментальні дослідження та рекомендації для практичного впровадження. Ці результати можуть бути використані при розробці нормативних документів що регламентують функціонування та впровадження ІТП, а також для проектування та оптимізації реальних систем ЦТ з урахуванням більш глибокої інтеграції ВДЕ.

У першому розділі подано комплексний огляд літератури з питань розвитку ЦТ і теплових пунктів. Розглядаються технології різних поколінь ЦТ: від високотемпературних систем 1–3 поколінь до сучасних концепцій 4-го (4ПЦТ) і 5-го (5ПЦТХ) поколінь з низькими температурами теплоносія.

Окрему увагу приділено архітектурам теплових пунктів різного рівня — центральних (ЦТП), розподільчих (РТП), індивідуальних (ІТП), з урахуванням їхніх функціональних можливостей, гідравлічної структури та технічного оснащення. Визначено, що більшість традиційних ІТП мають односпрямовану архітектуру, яка обмежує гнучкість взаємодії з мережею, особливо у контексті впровадження ВДЕ.

Акцентовано увагу на інтеграції теплових насосів, використанні низькопотенційного тепла і цифрових систем управління в нових поколіннях ЦТ. Аналіз літературних джерел показав, що перехід до 4ПЦТ передбачає зниження температури мереж, введення теплових акумуляторів та акцент на енергоефективності. 5-те покоління об'єднує централізовані системи теплопостачання і холодопостачання у гнучку систему з широким використанням ВДЕ.

У цьому контексті особливу увагу присвячено проблемі інтеграції ВДЕ. Наведено аналіз досліджень, що описують використання сонячних колекторів, теплових насосів та джерел скидного тепла у ЦТ. Встановлено, що для успішного впровадження ВДЕ необхідне зниження температурного рівня мереж та модернізація інфраструктури, зокрема поширення ІТП. Розглянуто європейські директиви і національне законодавство щодо енергоефективності, які стимулюють розробку низькотемпературних інтегрованих систем теплопостачання. Аналіз літератури показав, що існуючі ІТП найчастіше мають односпрямовану архітектуру і обмежені можливості інтеграції локальних джерел.

Проведений огляд викрив ключові наукові прогалини: недостатність досліджень щодо 2Н-ІТП, які здатні не лише споживати тепло, а й повернути надлишки в мережу. З цієї точки зору науковою новизною розділу є підкреслення необхідності розвитку 2Н-ІТП як інфраструктурного компонента «розумних»

енергосистем майбутнього. У розділі акцентовано, що 2Н-ІТП розширюють можливості балансування локальних теплових потоків і підвищують гнучкість ЦТ, особливо при переході до 4ПЦТ.

Практичне значення цього аналізу полягає в систематизації відомих концепцій та методів модернізації ЦТ, що створює основу для подальшого впровадження енергоефективних рішень. Зокрема, виявлено, що перехід на низькотемпературний режим у поєднанні з системами цифрового моніторингу на всіх рівнях систем ЦТ значно розширює перелік доступних джерел тепла. Результати огляду можуть бути використані при оновленні навчальних і методичних матеріалів з систем ЦТ та плануванні модернізації теплових мереж, з урахуванням потреб інтеграції ВДЕ.

Другий розділ присвячений розробці принципової схеми та фізико-математичному моделюванню 2Н-ІТП. У межах розділу запропоновано нову конфігурацію 2Н-ІТП, що забезпечує гнучке керування потоками теплової енергії між системою ЦТ та локальними джерелами, зокрема тепловими насосами, сонячними колекторами й джерелами скидного тепла. Унікальною ознакою схеми є можливість двонаправленої циркуляції теплоносія з функціями рекуперації, накопичення надлишкового тепла й подальшої його передачі назад у тепломережу.

Систематизовано типові підходи до побудови двонаправлених схем із використанням буферних ємностей, змішувальних вузлів, регулювальних клапанів і циркуляційних насосів. Окрему увагу приділено алгоритмам керування пріоритетами: наприклад, коли тепла енергія подається переважно з ВДЕ, а джерело ЦТ використовується лише в пікові моменти або для балансування системи.

У другій частині розділу розроблено фізико-математичну модель теплових потоків у ключових компонентах 2Н-ІТП: теплообмінниках, буферних ємностях та гідравлічних контурах. Встановлено математичні залежності між температурними перепадами, витратами теплоносія та динамікою тепломасообміну. Введено енергетичну балансну модель теплового просьюмера, що враховує потоки теплової енергії з централізованої мережі, локальних джерел

і обсяг надлишків теплової енергії, переданих до мережі. Модель дозволяє кількісно оцінити коефіцієнт трансформації (COP) теплового насоса у складі системи та його вплив на загальну енергоефективність.

Ключовою науковою новизною цього розділу є розробка нової принципової схеми 2Н-ІТП, яка подана у патентній заявці з подальшою передачею прав інтелектуальної власності на винахід.

Адаптивні алгоритми керування, розроблені на основі PI-регулятора, враховують змінну динаміку теплового навантаження, температурні коливання зовнішнього середовища та ієрархію пріоритетів джерел тепла. Такий підхід дозволяє гнучко балансувати між локальною генерацією та централізованим джерелом, оптимізуючи енергетичні та економічні показники системи.

Наукова новизна розділу полягає у формалізації комплексної математичної моделі динаміки 2Н-ІТП, яка вперше враховує двонаправлений теплообмін між споживачем і мережею, а також поведінку теплового просьюмера в умовах реального споживання та змін зовнішніх впливів. Розроблена модель дозволяє виконувати прогнозування ефективності роботи 2Н-ІТП, здійснювати оцінку параметрів енергетичного балансу, а також застосовувати її для оптимізації проєктних рішень. Побудовані алгоритми можуть слугувати основою для створення цифрових двійників 2Н-ІТП — як складової частини інтелектуальних енергосистем.

Практична цінність отриманих результатів полягає у створенні інженерного та методологічного підґрунтя для проєктування та впровадження інноваційних теплових пунктів нового покоління.

У третьому розділі представлено експериментальне дослідження роботи 2Н-ІТП, побудованого на основі розробленої схеми та алгоритмів управління. Метою експерименту було підтвердження працездатності системи, валідація розроблених математичних моделей та виявлення впливу змінних зовнішніх умов на динаміку теплових потоків і режимів циркуляції.

У межах розділу описано побудову фізичного стенду, що моделює 2Н-ІТП з локальним джерелом тепла (електричним котлом як аналогом теплового насоса), баком-акумулятором, регулювальними клапанами, насосами та

вимірювальними приладами. Система реалізує три основні режими: споживання тепла з ЦТ, комбіновану подачу з локального та централізованого джерел, а також повернення надлишкової енергії в мережу.

Методика досліджень базувалася на безперервному моніторингу температур, витрат і теплових потоків у ключових точках системи, аналізі перехідних процесів, що виникали при зміні джерел постачання, а також тепловізійному контролю температурного профілю системи.

Результати експерименту підтвердили ефективність реалізованих алгоритмів керування. Виявлено, що при досягненні критичної температури в верхній зоні акумулятора (близько 48 °C), система автоматично переходить у режим рекуперації з передачею до 2,7 кВт теплової енергії назад у мережу. Під час добового тестового циклу з постійним навантаженням на опалення було спожито 13 кВт·год тепла, з яких 12 кВт·год було згенеровано локальним джерелом, а 9 кВт·год повернуто в систему ЦТ. Визначено внесок джерел у комбінованому режимі: централізоване тепло — 76,9 %, локальне — 23,1 %, повернення тепла — 90 % від обсягів локальної генерації.

Польова верифікація результатів здійснена на прикладі об'єкта Danfoss Smart Store (м. Нордборг, Данія), де впроваджено тепловий пункт з функцією зворотного постачання надлишкового тепла від холодильних установок CO₂. Аналіз режимів роботи цього об'єкта підтвердив релевантність отриманих результатів та універсальність підходу до побудови 2Н-ІТП.

Наукова новизна розділу полягає у практичній реалізації принципів двонаправленої взаємодії з тепломережею, підтвердженні гнучкості переходу між режимами, а також у верифікації теплових моделей та керуючих алгоритмів у реальному часі. Експериментально доведено, що сучасна архітектура ІТП може виконувати функцію теплового просьюмера з можливістю інтеграції до декарбонізованих мереж.

Практичне значення досліджень полягає у створенні методики апробації 2Н-ІТП, що може бути використана для типових випробувань інноваційних теплових систем підключених до систем ЦТ та локальних ВДЕ, а також у

підготовці інженерних рекомендацій для подальшого впровадження подібних технологій у системах централізованого теплопостачання.

У четвертому розділі розроблено методику інженерного розрахунку 2Н-ІТП, яка забезпечує поєднання алгоритмічних, конструктивних і теплотехнічних аспектів функціонування системи в умовах взаємодії з системою ЦТ і локальними джерелами тепла. Запропоновано структуровані схеми-алгоритми функціонування 2Н-ІТП в режимах автономної, комбінованої та рекуперативної роботи, що дозволяє оптимізувати потоки теплової енергії відповідно до температурного графіка, стану бака-акумулятора та потужності локального джерела.

Окрему увагу приділено функціональній схемі реалізації системи, яка включає регулювальні клапани, теплообмінники, регульовані насоси, бак-акумулятор та інтелектуальний контролер. Висвітлено підсистеми автоматизації та зв'язок компонентів через термодатчики, витратоміри та виконавчі пристрої, що дозволяє гнучко керувати тепловими потоками в реальному часі. Розроблено правила налаштування PI-регуляторів відповідно до змінних зовнішніх умов.

На основі експериментальних вимірювань проведено масштабування до системи 2Н-ІТП потужністю 85 кВт. Встановлено, що така система дозволяє зменшити споживання тепла з боку ЦТ на 74 %, при цьому до 61 % теплової енергії, виробленої локальним джерелом, може бути повернуто в мережу. Чисті витрати на енергоспоживання за місяць експлуатації склали лише 12,6 тис. грн проти 120,7 тис. грн в системі без ІТП, а скоригована сезонна економія сягнула 583,5 тис. грн. За інвестиційних витрат 2,15 млн грн розрахований термін окупності становить 3,69 роки, чиста приведена вартість (NPV) – 1,43 млн грн, індекс прибутковості – 1,66. Це підтверджує інвестиційну доцільність упровадження 2Н-ІТП у рамках модернізації систем 4-го та 5-го поколінь ЦТ.

Уперше виконано оцінку впливу інтеграції 2Н-ІТП на параметри системи ЦТ: зниження температур, децентралізація навантажень, зменшення пікового споживання тепла. Сформульовано практичні рекомендації для впровадження, зокрема — необхідність адаптації нормативної документації до нових принципів роботи теплових пунктів.

Наукова новизна розділу полягає в комплексному підході до розрахунку та проектування 2Н-ІТП, який враховує не лише теплові потоки, але й гнучкість регулювання, цифрову інтеграцію та потенціал енергообміну з ЦТ. Практична значущість — у створенні придатної до реалізації методики, яка може бути використана як у новому будівництві, так і при модернізації існуючих систем.

Ключові слова: централізоване теплопостачання, енергоефективність, тепловий пункт, тепловий насос, розумна енергетична система, відновлювані джерела енергії, двонаправлений тепловий пункт, сталий розвиток, математичне моделювання теплових потоків, скидне тепло, просьмер.

Список публікацій: За результатами досліджень опубліковано 8 наукових праць, у тому числі 4 статті у наукових фахових виданнях та 4 тез доповідей у збірниках матеріалів конференцій.

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Гламазін, П. М., **Баранчук, К. О.**, & Приймак, О. В. (2021). Нові підходи до організації централізованого теплопостачання. Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання, 39, 38-46. <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2021.39.38-46>
2. **Баранчук К. О.**, Любарець О. П. (2025). Еволюція теплових пунктів: від парових систем до теплових просьюмерів. Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання, 53, 2025, с. 6-20. <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2025.53.6-20>
3. Тимощенко, А., Погосов, О., Пасічник, П., Кулінко, Є., Козячина, Б., & **Баранчук, К.** (2025). Дослідження технологічних систем паропостачання та можливі шляхи підвищення їх енергетичної ефективності на прикладі пристроїв для розморожування вагонів. Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання, 50, 6–28. <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2024.50.6-28>
4. **Баранчук К.**, Погосов О. Адаптація алгоритму Heat Recovery Control для двонаправлених теплових пунктів та аналіз моделей енергетичного ринку.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

5. **Баранчук К.О.** Використання відновлюваних джерел енергії при зеленому будівництві та їх комбінування. Матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції «Green Construction» («Зелене будівництво»). Київ: Київський національний університет будівництва і архітектури. 2024, с.31-33.
https://www.knuba.edu.ua/wp-content/uploads/2024/05/zbirnyk_gotovuj-4.pdf
6. **Баранчук К.О.** (2023) Електрифікація централізованого теплопостачання та роль комбінованих теплових пунктів. Робоча програма і тези доповідей міжнародної науково-практичної конференції «Екологія. Ресурси. Енергія» 22-24.11.2023, м. Київ, с. 99-101.
7. Гламаздін П.М., **Баранчук К.О.** (2023) Перспективи розвитку систем централізованого теплопостачання. Робоча програма і тези доповідей міжнародної науково-практичної конференції «Екологія. Ресурси. Енергія» 22-24.11.2023, м. Київ, с. 87-88. https://www.knuba.edu.ua/wp-content/uploads/2023/11/jere_2023_program_tезy.pdf
8. Гламаздін П.М., **Баранчук К.О.** (2022) Перспективні напрямки розвитку абонентських введів. Робоча програма і тези доповідей міжнародної науково-практичної конференції «Екологія. Ресурси. Енергія» 23-25.11.2022, м. Київ, с. 80-81. <http://www.ere.org.ua/>

ABSTRACT

Baranchuk K. Heat supply systems with energy efficiency bidirectional heating substations – Qualification Scientific Work as a Manuscript.

Dissertation for the Degree of Doctor of Philosophy in Specialty 192 "Construction and Civil Engineering" (19 – Architecture and Construction). – Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, 2025.

The main content of the dissertation. The dissertation explores innovative solutions for district heating based on energy efficiency bidirectional individual heating substation (2-way-IHS). The introductory part emphasizes that modern district heating (DH) systems are moving to 4th and 5th generation models with low-temperature networks and a high content of renewable energy sources (RES). IHSs, which not only

receive heat from the network, but also transfer excess heat back to the network, are becoming particularly relevant.

The scientific novelty of the work lies in the formulation of the scientific principles of construction and operation of 2-way-IHS, the development of new schemes and algorithms for their operation. The practical significance lies in substantiating the effectiveness of 2-way-IHS for reducing heat losses, integrating local RES, and increasing the flexibility of the DH system. The paper outlines promising areas for the development of modern digital platforms for monitoring and controlling 2-way-IHS which will contribute to further automation of processes, adaptive control and forecasting of thermal loads.

The dissertation contains original scientifically based developments: new schemes of heating substation, methods of modeling and controlling 2-way-IHS, experimental studies and recommendations for practical implementation. These results can be used in the development of regulatory documents regulating the functioning and implementation of IHS, as well as for the design and optimization of real DH systems taking into account deeper integration of RES.

The first chapter provides a comprehensive review of the literature on the development of DH and heating substations. Technologies of different generations of DH are considered: from high-temperature systems of the 1st–3rd generations to modern concepts of the 4th (4GDH) and 5th (5GDHC) generations with low water temperatures.

Special attention is paid to the architectures of heating substations of different levels - central (CHS), distribution (DHS), individual (IHS), taking into account their functional capabilities, hydraulic structure and technical equipment. It is determined that most traditional IHSs have a unidirectional architecture, which limits the flexibility of interaction with the network, especially in the context of the implementation of RES.

The focus is on the integration of heat pumps, the use of waste heat and digital control systems in new generations of DH. Analysis of literary sources showed that the transition to 4GDH involves reducing the temperature of networks, introducing thermal energy storage and focusing on energy efficiency. The 5th generation combines district heating and cooling systems into a flexible system with extensive use of RES.

In this context, special attention is paid to the problem of RES integration. An analysis of studies describing the use of solar collectors, heat pumps and waste heat sources in DH is presented. It is established that for the successful implementation of RES, it is necessary to reduce the temperature level of networks and modernize the infrastructure, in particular the spread of IHSs. European directives and national legislation on energy efficiency are considered, which stimulate the development of low-temperature integrated DH systems. An analysis of the literature showed that existing IHSs most often have a unidirectional architecture and limited possibilities for integrating local sources.

The review revealed key scientific gaps: the lack of research on 2way-IHS, which are able not only to consume heat, but also to return surpluses to the network. From this point of view, the scientific novelty of the section is the emphasis on the need to develop 2way-IHS as an infrastructure component of "smart" energy systems of the future. The section emphasizes that 2way-IHS expand the possibilities of balancing local heat flows and increase the flexibility of DH, especially when transitioning to 4GDH. The practical significance of this analysis lies in the systematization of known concepts and methods of DH modernization, which creates the basis for the further implementation of energy efficiency solutions. In particular, it was found that the transition to a low-temperature regime in combination with digital monitoring systems at all levels of DH systems significantly expands the list of available heat sources. The results of the review can be used when updating educational and methodological materials on DH systems and planning the modernization of heating networks, taking into account the needs of integrating RES.

The second chapter is devoted to the development of a schematic diagram and physical and mathematical modeling of 2way-IHS . Within the framework of the section, a new 2way-IHS configuration is proposed, which provides flexible control of heat energy flows between the DH system and local sources, in particular heat pumps, solar collectors and waste heat sources etc. A unique feature of the scheme is the possibility of bidirectional circulation of the coolant with the functions of recovery, accumulation of excess heat and its subsequent transfer back to the heating network.

Typical approaches to the construction of bidirectional schemes using thermal energy storage, mixing units, control valves and circulation pumps are systematized. Special attention is paid to priority control algorithms: for example, when thermal energy is supplied mainly from RES, and the DH source is used only at peak times or for system balancing.

In the second part of the section, a physical and mathematical model of heat flows in the key components of the 2way-IHS is developed: heat exchangers, buffer tanks and hydraulic circuits. Mathematical relationships between temperature differences, water flow rates and heat and mass transfer dynamics are established. An energy balance model of a thermal prosumer is introduced, which takes into account heat energy flows from a DH network, local sources and the amount of excess heat energy transferred to the network. The model allows us to quantitatively assess the coefficient of performance (COP) of the heat pump in the system and its impact on overall energy efficiency.

The key scientific novelty of this section is the development of a new schematic diagram of the 2way-IHS , which is submitted in a patent application with the subsequent transfer of intellectual property rights to the invention.

Adaptive control algorithms developed on the basis of the PI controller take into account the variable dynamics of the heat load, temperature fluctuations of the external environment and the hierarchy of priorities of heat sources. This approach allows for flexible balancing between local generation and a DH source, optimizing the energy and economic indicators of the system.

The scientific novelty of the section lies in the formalization of a complex mathematical model of the dynamics of 2way-IHS, which for the first time takes into account the bidirectional heat exchange between the consumer and the network, as well as the behavior of the thermal prosumer under conditions of real consumption and changes in external influences. The developed model allows for the prediction of the efficiency of the 2way-IHS operation, the assessment of the energy balance parameters, and also its use for the optimization of design solutions. The constructed algorithms can serve as the basis for the creation of digital twins of 2way-IHS - as a component of intelligent energy systems.

The practical value of the results obtained lies in creating an engineering and methodological basis for the design and implementation of innovative new generation heating substations.

The third chapter presents an experimental study of the operation of the 2-way-IHS, built on the basis of the developed scheme and control algorithms. The purpose of the experiment was to confirm the system's operability, validate the developed mathematical models, and identify the impact of variable external conditions on the dynamics of heat flows and circulation modes.

The section describes the construction of a physical stand that simulates the 2-way-IHS with a local heat source (an electric boiler as an analogue of a heat pump), a thermal energy storage, control valves, pumps, and measuring instruments. The system implements three main modes: heat consumption from the DH, combined supply from local and DH sources, and the return of excess energy to the network.

The research methodology was based on continuous monitoring of temperatures, flows, and heat flows at key points of the system, analysis of transient processes that occurred when changing supply sources, and thermal imaging control of the system's temperature profile.

The results of the experiment confirmed the effectiveness of the implemented control algorithms. It was found that when a critical temperature is reached in the upper zone of the accumulator (about 48°C), the system automatically switches to the recovery mode with the transfer of up to 2.7 kW of thermal energy back to the network. During the daily test cycle with a constant heating load, 13 kWh of heat was consumed, of which 12 kWh was generated by a local source, and 9 kWh was returned to the DH system. The contribution of the sources in the combined mode was determined: DH - 76.9%, local source - 23.1%, heat return - 90% of the volumes of local generation.

Field verification of the results was carried out on the example of the Danfoss Smart Store facility (Nordborg, Denmark), where a heating substation with the function of returning excess heat from CO₂ refrigeration units was implemented. The analysis of the operating modes of this facility confirmed the relevance of the results obtained and the universality of the approach to building a 2-way-IHS.

The scientific novelty of the section lies in the practical implementation of the principles of bidirectional interaction with the heating network, confirmation of the flexibility of the transition between modes, as well as in the verification of thermal models and control algorithms in real time. It has been experimentally proven that the modern architecture of the 2-way-IHS can perform the function of a thermal prosumer with the possibility of integration into decarbonized networks.

The practical significance of the research lies in the creation of a methodology for testing 2-way-IHS, which can be used for typical tests of innovative heating systems connected to DH systems and local RES, as well as in the preparation of engineering recommendations for the further implementation of similar technologies in DH systems.

In the fourth chapter, a methodology for engineering calculation of 2-way-IHS is developed, which provides a combination of algorithmic, constructive and heat engineering aspects of the system's operation in conditions of interaction with the DH system and local heat sources. Structured schemes-algorithms for the operation of 2-way-IHS in autonomous, combined and recuperative operation modes are proposed, which allows optimizing heat energy flows according to the temperature schedule, the state of the accumulator tank and the power of the local source.

Special attention is paid to the functional scheme of the system implementation, which includes control valves, heat exchangers, adjustable pumps, thermal energy storage and intelligent controller. Automation subsystems and component communication via temperature sensors, flow meters and actuators are highlighted, which allows flexible control of heat flows in real time. Rules for setting PI regulators according to variable external conditions are developed.

Based on experimental measurements, scaling to a 2-way-IHS system with a capacity of 85 kW is carried out. It was found that such a system allows to reduce heat consumption from the DH by 74%, while up to 61% of the heat energy generated by a local source can be returned to the network. Net energy consumption costs per month of operation amounted to only 12.6 thousand UAH against 120.7 thousand UAH in the system without IHS, and the adjusted seasonal savings reached 583.5 thousand UAH. With investment costs of 2.15 million UAH, the calculated payback period is 3.69

years, net present value (NPV) is 1.43 million UAH, and the profitability index is 1.66. This confirms the investment feasibility of implementing 2-way-IHS as part of the modernization of 4th and 5th generation DH systems.

For the first time, an assessment of the impact of 2-way-IHS integration on the parameters of the DH system was performed: temperature reduction, load decentralization, and reduction of peak heat consumption. Practical recommendations for implementation are formulated, in particular, the need to adapt regulatory documentation to the new principles of operation of heating substation.

The scientific novelty of the section lies in the integrated approach to the calculation and design of 2-way-IHS, which takes into account not only heat flows, but also the flexibility of regulation, digital integration and the potential of energy exchange with DH. The practical significance lies in the creation of a methodology suitable for implementation, which can be used both in new construction and in the modernization of existing systems.

Keywords: district heating, energy efficiency, heating substation, heat pump, smart energy system, renewable energy sources, bidirectional heating substation, sustainable development, mathematical modeling of heat flows, waste heat, prosumer.