НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ “ОДЕСЬКА ПОЛІТЕХНІКА”
МІНІСТРСТВА ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ “ОДЕСЬКА ПОЛІТЕХНІКА”
МІНІСТРСТВА ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова

праця на правах рукопису

СЕРГЄЄВ МИКОЛА ІГОРОВИЧ

УДК 620.9 049.34: 620.91:621.643.053:643.334:621:658.264

ДИСЕРТАЦІЯ

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНОГО ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ ЗА РАХУНОК ВИКОРИСТАННЯ ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ ТА ГІБРИДНИХ ЗАСОБІВ АКУМУЛЮВАННЯ ТЕПЛОТИ

Спеціальність 144 – Теплоенергетика

Галузь знань 14 – Електрична інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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

_____М.І. Сергєєв

Науковий керівник Денисова Алла Євсіївна,
доктор технічних наук, професор

Одеса – 2025

АНОТАЦІЯ

Сергеєв М.І. **Підвищення ефективності децентралізованого теплопостачання за рахунок використання відновлювальних джерел енергії та гібридних засобів акумулювання теплоти**. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 144 – Теплоенергетика. – Національний університет "Одеська політехніка" МОН України, Одеса, 2025.

У вступі показано актуальність та особливості застосування інноваційних технології децентралізованого теплопостачання за рахунок раціонального використання альтернативних теплогенераторів, різнорідних за взаємно компенсуючими властивостями, змінних у часі відновлюваних джерел енергії (РВДЕ) та гібридних засобів акумулювання теплоти, беручи до уваги регіональні кліматичні умови, що створює позитивний вплив не тільки на енергетичну спроможність, а й екологічні показники перебігу процесів в елементах системи.

На підставі аналізу результатів сучасних вітчизняних та світових досліджень, зважаючи на гостру потребу в застосуванні інноваційних методів акумулювання енергії, можна зробити висновок, що запитом практики є розробка науково-обґрунтованого інструментарію для практичної реалізації децентралізованого теплопостачання (ДСТ) на базі альтернативних теплогенераторів, РВДЕ та гібридних засобів акумулювання теплоти для широкого спектру споживачів галузі теплоенергетики.

Для визначення ефективності застосування інноваційних методів акумулювання теплоти мають бути застосовані математичні моделі, які дозволяють обґрунтовано обирати схемно-конструктивні й технологічні рішення для практичної реалізації ДСТ, в структуру яких входять теплові насоси РВДЕ та гібридні засоби акумулювання енергії, за умови, що взято до уваги регіональні кліматичні умови та енергетичну спроможність РВДЕ.

Слід наголосити, що саме такий підхід до удосконалення технологій децентралізованого теплозабезпечення на основі альтернативних теплогенераторів

з РВДЕ, які задні до взаємної компенсації дефіциту енергії одне одного та гібридними засобами акумулювання енергії, можна вважати надійним інструментарієм забезпечення надійного функціонування всіх елементів ДСТ, що є актуальною науково-технічною задачею, на вирішення якої спрямовано дане дослідження.

В дисертаційній роботі визначено об'єкт, предмет, задачі та методи дослідження; наведено наукову новизну та практичну значимість отриманих результатів дослідження; висвітлено особистий внесок здобувача.

У розділі 1 дисертаційної роботи висвітлено засади функціонування різних технологій теплопостачання, на підставі аналізу яких встановлені їх позитивні та негативні сторони. Це дозволило виділити впливові чинники ефективного впровадження децентралізованої системи теплозабезпечення з автономними генераторами теплоти, необхідно використовувати різнорідні ЗВДЕ, які відрізняються здібністю до взаємної компенсації дефіциту одне одного, та гібридними засобами накопичення теплоти. Для вирішення проблем енергозбереження необхідна розробка математичної моделі, на основі використання якої можна визначити раціональні умови функціонування децентралізованої системи теплозабезпечення, зі взяттям до уваги технічного потенціалу РВДЕ і кліматичних чинників.

Отже, запитом практики є вирішення актуального науково-практичного завдання, яке стимулює прискорення впровадження новітніх технологій ДСТ шляхом використання теплонасосних генераторів теплоти на базі РВДЕ та гібридних засобів акумулювання енергії, що сприятиме стратегії сталому розвитку на основі впровадження новітніх технологій екологізації за рахунок зменшення частки використання викопних первинних енергоресурсів та енергозбереження, відповідно.

Для забезпечення умов гібридного акумулювання теплоти в системах децентралізованого енергопостачання в Україні існує можливість використання РВДЕ, які можна використовувати в інноваційних автономних генераторах теплоти, для подальшого корисного використання широким колом споживачів

галузі теплоенергетики. Рішення про доцільність впровадження засобів гібридного акумулювання енергії в системах децентралізованого енергопостачання обґрунтовується за результатами визначення ефективності роботи інноваційної системи, з урахуванням техніко-економічних і еколого-енергетичних переваг.

Сформульовано принципи та завдання вдосконалення режимів функціонування ДСТ з автономними теплогенераторами, РВДЕ та гібридних засобів акумулювання енергії, технічний потенціал яких визначається регіональними можливостями.

Перший пункт наукової новизни полягає в наступному: для обґрунтування ефективного функціонування ДСТ з автономними теплогенераторами, РВДЕ та гібридними засобами акумулювання енергії необхідно використати інструментарій математичного моделювання, який є підставою для визначення доцільності інтеграції гібридних засобів акумулювання енергії для широкого спектру споживачів галузі теплоенергетики.

У розділі 2 запропонована методика чисельного моделювання на основі енергетичного балансу для визначення енергетичної ефективності, кумулятивної енергоємності та економічних показників системи, які містять фактор часу функціонування ДСТ з інноваційними теплогенераторами, РВДЕ та гібридними засобами акумулювання енергії. Серед найбільш впливових показників розглядаються: термін окупності, норма прибутку, тест першого року.

Оцінка ефективності залучення засобів гібридного акумулювання енергії в децентралізовані системи теплопостачання з використанням автономних генераторів теплоти, РВДЕ та широкого спектру гібридних засобів акумулювання енергії має бути з обов’язковим взяттям до уваги технічного потенціалу РВДЕ та кліматичних чинників.

Другий пункт наукової новизни полягає в наступному: шляхом математичного моделювання обґрунтовано техніко-економічну доцільність використання децентралізованої системи теплозабезпечення з використанням інноваційних автономних генераторів теплоти, різнорідних ЗВДЕ, які є достатніми за технічним

ресурсом для використання в регіональних умовах, та широкого спектру гібридних засобів акумулювання.

У розділі 3 обґрунтовано умови раціонального використання РВДЕ для систем децентралізованого теплозабезпечення, для чого застосовано інструментарій чисельного моделювання теплової і економічної ефективності ДСТ з використанням сонячних колекторів і акумуляторів теплоти різного типу для попереднього підігріву води в автономному генераторі теплоти, які забезпечили ефективність рішень та раціональні режими функціонування системи.

Визначено собівартість теплоти, згенерованої гібридною системою з сонячними колекторами і акумуляторами теплоти в функції температури нагріву води в СК, з урахуванням їх питомої вартості. Визначено річний економічний ефект від використання гібридної системи підготовки води для котла в СК і акумуляторах теплоти. Встановлено характер впливу на собівартість виробленої теплоти та на її економічну ефективність питомої вартості СК.

Обґрунтовано раціональні умови застосування інноваційних технологій енергозбереження для децентралізованих систем теплопостачання з використанням РВДЕ та гібридних засобів акумулювання теплоти для підвищення ефективності і надійності забезпечення теплових потреб широкого спектру споживачів галузі теплоенергетики. Аналіз результатів чисельного моделювання процесів в елементах ДСТ з експериментальними даними дозволив встановити умови ефективного функціонування системи з максимальною часткою заміщення теплопродуктивності автономного генератора теплоти за рахунок накопичення теплоти в БА.

Третій пункт наукової новизни полягає в наступному: теоретичним і експериментальним шляхом визначено техніко-економічну доцільність використання ДСТ з гібридними засобами акумулювання енергії з локальними генераторами теплоти, які працюють на альтернативних видах палива, з урахуванням регіональних можливостей і потреб.

У розділі 4 за результатами чисельного моделювання обґрунтовано раціональні схемно-конструктивні рішення, які забезпечують доцільність

використання гібридних засобів акумулювання енергії в децентралізованих системах теплозабезпечення з локальними генераторами теплоти на базі різнорідних за фізичними властивостями ЗВДЕ. Розроблено пропозиції щодо оптимізації параметрів поліструктурних децентралізованих систем теплопостачання з використанням кумулятивного ефекту накопичення теплоти стінами будівлі, які сприяють зменшенню теплового навантаження та собівартості генерації теплоти, і не потребують додаткових капітальних внесків.

Четвертий пункт наукової новизни полягає в наступному: визначено ефективність застосування гібридних засобів акумулювання енергії в поліструктурних децентралізованих системах теплозабезпечення з тепловими генераторами теплоти з використанням РВДЕ. Запропоновано схемно-конструктивні та режимні ДСТ, які забезпечують високі частки заміщення викопних ПЕР, та сприяють зменшенню теплового навантаження та собівартості генерації теплоти без додаткових капітальних внесків.

***Ключові слова*:** математичне моделювання, енергетичний баланс, децентралізована система теплопостачання, гібридні засоби акумулювання теплоти, теплонасосна генерація, різнорідні відновлювальні джерела енергії, кумулятивний ефект накопичення теплоти, енергоефективність.

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. G. Luzhanska, M. Galatsan, M. Serheiev, S. Gryshchenko, P. Kandieiev. Research of heat generation and consumption modes in combined heat supply systems using alternative energy sources // Proceedings of Odessa Polytechnic University, Issue 1(65), 2022. – P. 40–49.– Режим доступу: DOI: https://doi.org/10.15276/opu.1.69.2024.05 https://pratsi.op.edu.ua/index.php/pratsi/article/view/445/444
(Реєстр наукових фахових видань України, категорія «Б»)

2. Рєпін Ю., Грищенко С., Климчук Н., Сергеєв М., Ткачов О. (2024). Ефективність роботи теплових насосів із відбором теплоти від ґрунту та зовнішнього повітря в житлових будинках // Refrigeration Engineering and

Technology, 60(2). – С. 122–120. – Режим доступу: https://doi.org/10.15673/ret.v60i2.2951 (Реєстр наукових фахових видань України, категорія «Б»)

3. O. Klymchuk, G. Luzhanska, G. Balasanian, M. Serheiev, I. Aksyonova. Application of CAD technologies for research of heat exchange units of microclimate systems based on alternative energy sources. (2022) // Proceedings of the Odesa Polytechnic University, Issue 1(65), 2022, 47–55. – Режим доступу: DOI: https://doi.org/10.15276/opu.1.65.2022.05

4. Лужанська Г.В., Бабаєв Є.С., Сергеєв М.І., Паламарчук О.О., Фуркаленко О.Л. (2024). Підвищення ефективності роботи автономних систем теплопостачання для індивідуального опалення з застосуванням теплових насосів // Refrigeration Engineering and Technology, 60 (3). С. 197–204. – Режим доступу: DOI https://doi.org/10.15673/ret.v60i3.3000 (Реєстр наукових фахових видань України, категорія «Б»)

5. A.E Denysova, M.I. Serheiev (2025). The toolkit for rising the efficiency of heat pump heating system using the accumulation of heat by walls of the building // Refrigeration Engineering and Technology, Issue 60(4). – Режим доступу: DOI https://doi.org/10.15673/ret.v61i1.3095

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

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

6. Лужанська Г.В., Сергеєв М.І., Чумаченко А.М., Климчук І.О., Михайленко М.С. Потенціал сонячної енергетики в Україні // Proceedings of the XXIII International Scientific and Practical Conference “World ways and methods of improving outdated theories and trends”. Zagreb, Croatia June 11 – 14, 2024. С. 368–371. – Режим доступу: https://isg-konf.com/world-ways-and-methods-of-improving-outdated-theories-and-trends/

7. Лужанська Г.В., Бабаєв Є.С., Сергеєв М.І., Позднякова Г.І. Климчук І.О. Аналіз сучасного стану енергопостачання для комунальної енергетики в

загальному енергетичному балансі країни // Proceedings of the 9th International Scientific and Practical Conference “Theory and practice of science: key aspects”. Rome, Italy, February 19-20, 2024. P. 496–502. – Режим доступу: DOI: https://doi.org/10.51582/interconf.19-20.02.2024 https://archive.interconf.center/index.php/2709-4685/issue/view/19-20.02.2024/199

8. Климчук О.А., Андрющенко А.М., Бабаєв Є.С., Сергеєв М.І. Переведення теплопостачання районів міст на електроенергію з використанням існуючих теплових мереж // Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Енергоефективне місто. XXI століття». Секція; Енергоефективні інженерні системи міст. Одеса, ОДАБА, 10–11 листопада 2022.– С. 74 – 76. – Режим доступу: https://odaba.edu.ua/upload/files/Zbirnik_Energoefektivne_misto_2022_1.pdf

9. Климчук О. А., Бабаєв Є. С. , Сергеєв М. І. Підвищення ефективності використання теплових насосі в у комбінованих системах теплопостачання при змінних режимах експлуатації будівель, С. 24 //Збірка наукових праць XI Наукової конференції “Наукові підсумки 2022 року. Харків, Х.: Технологічний центр, 2022. – 81 с. – Режим доступу: https://entc.com.ua/uk/konferentsii/610-naukovi-pidsumky-roku

10. Serheiev M. I. Heat pump system using the subsoil and waste waters energy // Proceedings of XIII International Scientific Conference in Spain “Science and society: tools of modern innovative development”. May 06-09, 2025. – Режим доступу: https://isg-konf.com/science-and-society-tools-of-modern-innovative-development/

11. Сергеєв М. І. Доцільність застосування теплонасосних установок на основі інструментарію визначення еколого-енергетичних показників // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров’я: тези доповідей XXXIII міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2025, 14-17 травня 2025 р. / за ред. проф. Сокола Є.І. – Харків: НТУ «ХПІ». – С. 797. – Режим доступу: https://ndch.kpi.kharkov.ua/wp-content/uploads/2025/05/Zbirnik-tez-2025.pdf

ABSTRACT

Serheiev M.I. Increasing the efficiency of decentralized heat supply through the use of renewable sources of energy and hybrid means of heat accumulation.

Thesis for the degree of Doctor of Philosophy in the Specialty 144 Heat power engineering. – Odessa Polytechnic National University of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Odesa, 2025.

The introduction shows the relevance and features of the application of innovative technologies for decentralized heating through the rational use of all means of alternative heat generators, heterogeneous in mutually compensating properties, time-varying renewable energy sources (HVDE) and hybrid heat storage devices, taking into account regional climatic conditions, which creates a positive impact not only on energy capacity, but also on environmental indicators of processes in the system elements.

Based on the analysis of the results of modern domestic and international research, given the urgent need for the application of innovative energy storage methods, it can be concluded that the demand of practice is the development of scientifically based tools for the practical implementation of decentralized heating systems (DHS) based on alternative heat generators, HVDE and hybrid heat storage devices for a wide range of consumers in the heat energy industry.

To determine the effectiveness of the application of innovative heat storage methods, mathematical models should be used that allow for a reasonable choice of schematic, design and technological solutions for the practical implementation of DHS, the structure of which includes heat pumps of renewable energy sources and hybrid energy storage devices, provided that regional climatic conditions and the energy capacity of renewable energy sources are taken into account.

It should be emphasized that it is precisely such an approach to improving decentralized heat supply technologies based on alternative heat generators with renewable energy sources that are capable of mutually compensating for each other's energy deficit and hybrid energy storage devices that can be considered a reliable tool for ensuring the reliable functioning of all elements of DHS, which is an urgent scientific and technical problem, the solution of which is the subject of this study.

The dissertation work defines the object, subject, tasks and methods of research; the scientific novelty and practical significance of the obtained research results are presented; the personal contribution of the applicant is highlighted.

In section 1 of the dissertation work, the principles of operation of various heat supply technologies are highlighted, based on the analysis of which their positive and negative sides are established. This allowed us to identify the influential factors for the effective implementation of a decentralized heat supply system with autonomous heat generators, it is necessary to use heterogeneous RES, which differ in their ability to mutually compensate for each other's deficits, and hybrid means of heat storage. To solve energy saving problems, it is necessary to develop a mathematical model, based on which it is possible to determine the rational conditions for the operation of a decentralized heat supply system, taking into account the technical potential of HRES and climatic factors.

Therefore, the demand of practice is to solve the current scientific and practical problem, which stimulates the acceleration of the implementation of the latest technologies of the DHS through the use of heat pump heat generators based on renewable energy sources and hybrid energy storage devices, which will contribute to the strategy of sustainable development based on the implementation of the latest technologies of greening by reducing the share of fossil primary energy resources and energy saving, respectively.

To ensure the conditions for hybrid heat storage in decentralized energy supply systems in Ukraine, there is a possibility of using renewable energy sources, which can be used in innovative autonomous heat generators, for further beneficial use by a wide range of consumers in the heat power industry. The decision on the feasibility of implementing hybrid energy storage devices in decentralized energy supply systems is justified by the results of determining the efficiency of the innovative system, taking into account technical, economic and environmental and energy advantages.

The principles and tasks of improving the operating modes of DHS with autonomous heat generators, HRES and hybrid energy storage devices, the technical potential of which is determined by regional capabilities, are formulated.

The first point of scientific novelty is the following: to substantiate the effective operation of DHS with autonomous heat generators, HRES and hybrid energy storage devices, it is necessary to use the tools of mathematical modeling, which is the basis for determining the feasibility of integrating hybrid energy storage devices for a wide range of consumers in the heat power industry.

In section 2 the numerical modeling technique based on the energy balance is proposed to determine the energy efficiency, cumulative energy intensity and economic indicators of the system, which include the time factor of operation of DST with innovative heat generators, HRES and hybrid energy storage devices. Among the most influential indicators are considered: payback period, profit rate, first-year test.

The assessment of the effectiveness of involving hybrid energy storage devices in decentralized heat supply systems using autonomous heat generators, HRES and a wide range of hybrid energy storage devices must necessarily take into account the technical potential of HRES and climatic factors.

The second point of scientific novelty is as follows: by means of mathematical modeling, the technical and economic feasibility of using a decentralized heat supply system using innovative autonomous heat generators, heterogeneous RES, which are sufficient in terms of technical resource for use in regional conditions, and a wide range of hybrid storage means is substantiated.

In section 3 the conditions for the rational use of HRES for decentralized heat supply systems are substantiated, for which the tools of numerical modeling of the thermal and economic efficiency of the DHS using solar collectors (SC) and heat accumulators of various types for preheating water in an autonomous heat generator are applied, which ensured the effectiveness of solutions and rational modes of operation of the system.

The cost of heat generated by a hybrid system with solar collectors and heat accumulators as a function of the water heating temperature in the solar collectors is determined, taking into account their specific cost. The annual economic effect of using a hybrid water preparation system for the boiler in the SC and heat accumulators is determined. The nature of the impact on the cost of the produced heat and its economic efficiency of the specific cost of the SC has been established.

The rational conditions for the application of innovative energy-saving technologies for decentralized heat supply systems using renewable energy sources and hybrid heat storage devices have been substantiated to increase the efficiency and reliability of providing heat needs for a wide range of consumers in the heat power industry. Analysis of the results of numerical modeling of processes in the elements of the DHS with experimental data allowed us to establish the conditions for the effective functioning of the system with the maximum share of replacing the heat productivity of the autonomous heat generator by heat storage in the tank accumulator.

The third point of scientific novelty is as follows: the technical and economic feasibility of using the DHS with hybrid energy storage devices with local heat generators operating on alternative fuels has been determined theoretically and experimentally, taking into account regional capabilities and needs.

To assess the feasibility of integrating hybrid energy storage devices into decentralized heating systems, it is necessary to develop a mathematical model based on the energy balance.

In section 4, based on the results of numerical modeling, rational schematic and design solutions are substantiated, which ensure the feasibility of using hybrid energy storage devices in decentralized heat supply systems with local heat generators based on HRES of heterogeneous physical properties. Proposals have been developed to optimize the parameters of polystructural decentralized heat supply systems using the cumulative effect of heat accumulation by the walls of the building, which contribute to reducing the heat load and the cost of heat generation, and do not require additional capital investments.

The fourth point of scientific novelty is as follows: the effectiveness of using hybrid energy storage devices in polystructural decentralized heat supply systems with heat generators using renewable energy sources is determined. Schematic and design and regime DSTs are proposed, which provide high replacement shares of fossil FERs, and contribute to reducing the heat load and the cost of heat generation without additional capital investments.

Keywords: mathematical modeling, energy balance, decentralized heat supply system, hybrid heat storage, heat pump generation, heterogeneous renewable energy sources, cumulative effect of heat storage, energy efficiency.

List of publications of the applicant on the topic of the dissertation

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

1. G. Luzhanska, M. Galatsan, M. Serheiev, S. Gryshchenko, P. Kandieiev. Research of heat generation and consumption modes in combined heat supply systems using alternative energy sources // Proceedings of Odessa Polytechnic University, Issue 1(65), 2022. – P. 40 – 49. – Режим доступу: DOI: https://doi.org/10.15276/opu.1.69.2024.05
https://pratsi.op.edu.ua/index.php/pratsi/article/view/445/444
(Реєстр наукових фахових видань України, категорія «Б»)

2. Рєпін Ю., Грищенко С., Климчук Н., Сергеєв М., Ткачов, О. (2024). Ефективність роботи теплових насосів із відбором теплоти від ґрунту та зовнішнього повітря в житлових будинках // Refrigeration Engineering and Technology, 60(2). – С. 122–120. – Режим доступу: https://doi.org/10.15673/ret.v60i2.2951
(Реєстр наукових фахових видань України, категорія «Б»)

3. O. Klymchuk, G. Luzhanska, G. Balasanian, M. Serheiev, I. Aksyonova. Application of CAD technologies for research of heat exchange units of microclimate systems based on alternative energy sources. (2022) // Proceedings of the Odesa Polytechnic University, Issue 1(65), 2022, 47–55. – Режим доступу: DOI: https://doi.org/10.15276/opu.1.65.2022.05

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

4. Лужанська Г.В., Бабаєв Є.С., Сергеєв М.І., Паламарчук О.О., Фуркаленко О.Л. (2024). Підвищення ефективності роботи автономних систем теплопостачання для індивідуального опалення з застосуванням теплових насосів // Refrigeration

Engineering and Technology, 60 (3). С. 197–204. – Режим доступу: DOI https://doi.org/10.15673/ret.v60i3.3000

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

5. A.E Denysova, M.I. Serheiev (2025). The toolkit for rising the efficiency of heat pump heating system using the accumulation of heat by walls of the building // Refrigeration Engineering and Technology, Issue 60(4). – Режим доступу: DOI https://doi.org/10.15673/ret.v61i1.3095

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

Published works of approbation nature:

6. Лужанська Г.В., Сергеєв М.І., Чумаченко А.М., Климчук І.О., Михайленко М.С. Потенціал сонячної енергетики в Україні // Proceedings of the XXIII International Scientific and Practical Conference "World ways and methods of improving outdated theories and trends". Zagreb, Croatia June 11 – 14, 2024. С. 368–371. – Режим доступу: https://isg-konf.com/world-ways-and-methods-of-improving-outdated-theories-and-trends/

7. Лужанська Г.В. Бабаєв Є.С. Сергеєв М.І. Позднякова Г.І. Климчук І.О. Аналіз сучасного стану енергопостачання для комунальної енергетики в загальному енергетичному балансі країни // Proceedings of the9thInternational Scientific and Practical Conference "Theory and practice of science: key aspects". Rome, Italy, February 19-20, 2024. P. 496–502. – Режим доступу: DOI: https://doi.org/10.51582/interconf.19-20.02.2024
https://archive.interconf.center/index.php/2709-4685/issue/view/19-20.02.2024/199

8. Климчук О.А., Андрющенко А.М., Бабаєв Є.С., Сергеєв М.І. Переведення теплопостачання районів міст на електроенергію з використанням існуючих теплових мереж // Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Енергоефективне місто. XXI століття». Секція; Енергоефективні інженерні системи міст. Одеса, ОДАБА, 10–11 листопада 2022.– С. 74 – 76. – Режим доступу: https://odaba.edu.ua/upload/files/Zbirnik_Energoefektivne_misto_2022_1.pdf

9. Климчук О. А., Бабаєв Є. С. , Сергеєв М. І. Підвищення ефективності використання теплових насосі в у комбінованих системах теплопостачання при змінних режимах експлуатації будівель, С. 24 //Збірка наукових праць XI Наукової конференції “Наукові підсумки 2022 року. Харків, Х.: Технологічний центр, 2022. – 81 с. – Режим доступу: https://entc.com.ua/uk/konferentsii/610-naukovi-pidsumky-roku

10. Serheiev M. I. Heat pump system using the subsoil and waste waters energy // XIII International Scientific Conference in Spain “Science and society: tools of modern innovative development. May 06-09, 2025. – Режим доступу: https://isg-konf.com/science-and-society-tools-of-modern-innovative-development/

11. Сергеєв М. І. Доцільність застосування теплонасосних установок на основі інструментарію визначення еколого-енергетичних показників // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров’я: тези доповідей XXXIII міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2025, 14-17 травня 2025 р. / за ред. проф. Сокола Є.І. – Харків: НТУ “ХПІ”. – С. 797. https://ndch.kpi.kharkov.ua/wp-content/uploads/2025/05/Zbirnik-tez-2025.pdf

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ……..... 20
ВСТУП…….. 21
РОЗДІЛ 1. ОСНОВНІ ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГЕТИКИ І ПЕРСПЕКТИВИ ВДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМ ТЕПЛОЗАБЕЗПЕЧЕНННЯ, АДАПТОВАНИХ ДО РИНКОВИХ ЦІН НА ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ…….. 32
1.1. Особливості світової політики щодо енергоефективності…….. 32
1.2. Енергоефективність секторів економіки України і ЄС……... 33
1.3. Аналіз сучасного стану енергоспоживання і енерговитрат в Україні……..... 36
1.3.1. Структура енергоспоживання за основними секторами економіки України ……..…….. 36
1.3.2. Структура енергоспоживання в житлово-комунальному секторі економіки України ……. 36
1.4. Аналіз стану теплозабезпечення об’єктів промислової і малої енергетики України та світу……..... 38
1.4.1. Причини перегляду концепції централізованого теплопостачання як єдиного напрямку розвитку теплоенергетики……... 38
1.4.2. Доцільність концепції централізованого теплопостачання для довготривалого періоду експлуатації ……..… 39
1.5. Перспективи використання технологій автономного теплопостачання з використанням низькопотенційних вторинних та змінних відновлюваних джерел енергії……. 40
1.6. Шляхи вдосконалення систем теплозабезпечення в умовах зміни цін на джерела енергії…….. 45
1.7. Моделювання темпів використання палива в енергетиці……... 47
1.8. Висновки до розділу…… 48

РОЗДІЛ 2. ІНСТРУМЕНТАРІЙ ВДОСКОНАЛЕННЯ ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНИХ СИСТЕМ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ, АДАПТОВАНИХ ДО РИНКОВИХ ЦІН НА ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ…….. 50
2.1 Особливості існуючої методики визначення економічних та екологічних ефектів використання ЗВДЕ…….. 50
2.2. Аналіз існуючих методів моделювання……... 50
2.3. Методика моделювання та алгоритм визначення енергетичних потреб об’єкту теплопостачання…….. 52
2.4. Аналіз ефективності використання традиційних та теплонасосних систем теплопостачання…….……... 57
2.5. Особливості використання вторинних та змінних відновлюваних джерел енергії для теплонасосних систем теплопостачання…… 58
2.6. Шляхи і методи підвищення ефективності децентралізованих теплонасосних систем теплопостачання……. 64
2.7. Висновки до розділу…….. 65
РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ В ЕЛЕМЕНТАХ ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНИХ ГІБРИДНИХ СИСТЕМ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ З СОНЯЧНИМИ КОЛЕКТОРАМИ, ГРУНТОВИМИ ТЕПЛООБМІННИКАМИ ТА АКУМУЛЯТОРАМИ ТЕПЛОТИ.……... 67
3.1. Схемно-конструктивні особливості гібридних схем теплопостачання з сонячними колекторами і акумуляторами теплоти …….……. 67
3.2. Економічна ефективність гібридних систем теплопостачання з сонячними колекторами і акумуляторами теплоти …… 73
3.3. Аналіз ефективності теплонасосних генераторів теплоти на базі різнорідних ЗВДЕ та накопичувачів теплоти, з урахуванням режимів роботи системи ……..... 79

3.4. Аналіз чинників впливу на ефективність функціонування теплонасосних установок з акумулюванням теплоти для автономного теплозабезпечення будівель громадського призначення …….…….. 80
3.5. Інструментарій моделювання функціонування ДСТ з використанням ТН і ТА для переривчастого режиму теплозабезпечення з урахуванням кліматичних умов …….……... 81
3.6. Моделювання теплових процесів на основі енергобалансу децентралізованої системи теплозабезпечення з ТН та кумулятивним ефектом накопичення теплоти …….…… 84
3.7. Аналіз результатів досліджень ефективності децентралізованої системи теплозабезпечення з ТН та баком-акумулятором теплоти при переривчастому режимі функціонування…….. 87
3.8. Висновки до розділу……. 91
РОЗДІЛ 4. РОЗДІЛ 4. ІНСТРУМЕНТАРІЙ ВИРІШЕННЯ РІВНЯННЯ ТЕПЛОВОГО БАЛАНСУ ТЕПЛОНАСОСНОЇ СИСТЕМИ З УРАХУВАННЯМ ГІБРИДНИХ ЗАСОБІВ НАКОПИЧЕННЯ ТЕПЛОТИ…… 93
4.1. Математична модель теплових процесів в об'єкті теплопостачання з використанням гібридних засобів акумулюванням теплоти …….. 93
4.2. Аналіз результатів чисельного моделювання ефективності децентралізованої системи теплопостачання при урахуванні кумулятивного ефекту накопичення теплоти стінами……. 102
4.3. Висновки до розділу…… 109
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ……... 110
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ …….. 112
ДОДАТОК А. Список публікацій здобувача за темою дисертації…… 124

ДОДАТОК Б. Енергетична ефективність акумулювання теплоти при використанні сонячних колекторів з екранованими поверхнями в схемі попереднього підігріву води котла…….... 127
ДОДАТОК В. Програми розрахунку ……..... 131
В.1. Радіаційно-кліматичних умов регіонів на основі добових даних……. 133
В2. Оптимального кута нахилу сонячного колектора для опалювального сезону…….. 133
ДОДАТОК Г. Чисельне моделювання системи попереднього підігріву води в СК децентралізованої системи теплопостачання з використанням програмного продукту RETScreen……..... 134
ДОДАТОК Д. Порівняння теплонасосних технологій з іншими технологіями перетворення електроенергії в теплоту при використанні ЗВДЕ та акумуляторів теплоти ……..
ДОДАТОК Є. Результати експериментальних досліджень …….. 138
Є.1. Функціонування ДСТ з тепловим насосом і акумулюванням теплоти .. 141
Є.2. Експериментальний стенд та елементи теплонасосної системи з акумулятором теплоти у складі ДСТ ……. 141 142
ДОДАТОК Ж. Висновки про впровадження результатів дослідження …….. 145

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АЕС – атомні електричні станції
АПЗЕ – акумуляційний параметр заміщення енергоресурсів
БТ – балансова точка теплового насосу
БА – бак-акумулятор теплоти
ВВП – валовий внутрішній продукт
ВДЕ – відновлювальні джерела енергії
ГЕАС – гідроакумуляційні електростанції
ГЕС – гідравлічні електростанції
ГЕ – гібридні енергетичні установки
ГВП – гаряче водопостачання
ГЗАТ – гібридні засоби акумулювання теплоти
ГСТ – гібридні системи теплопостачання
ДСТ – децентралізована система теплопостачання
ДЦТ – джерела централізованого теплопостачання
ЕСУ – енергетичний сектор України
ЄЗК – європейський зелений курс
ЗВДЕ – змінні відновлювальні джерела енергії
ККД – коефіцієнт корисної дії
КЗНТ – кумулятивні засоби накопичення теплоти
МЕА – Міжнародна енергетична агенція
НУОП – Національний університет «Одеська політехніка»
ОЕС – об'єднана енергетична система
ОЕСР – організація економічного співробітництва та розвитку
ОТ – об’єкт теплопостачання
СЕР – світова енергетична рада
ПЕР – первинні енергетичні ресурси
РВДЕ – різнорідні відновлювані джерела енергії
СОР – коефіцієнт перетворення теплового насосу
СС – геліосистема теплопостачання
СНВР – стратегія низьковуглецевого розвитку
ТА – тепловий акумулятор, акумулятор теплоти
ТГТ теплові грунтові трубки
ТЕС – теплові електричні станції
ТН – тепловий насос
ТНУ – теплонасосна установка
ТС – традиційна система енергопостачання
ЦГВП – централізоване гаряче водопостачання
ЦСТ – централізована система теплопостачання

ВСТУП

Актуальність теми. Енергоємність основних видів продукції в економіці України, величезні обсяги імпорту первинних енергоносіїв, дефіцит власної генерації енергії через вибуття генеруючих потужностей, технологічна недосконаліть енергоємних галузей, знос теплових мереж і обладнання – це головні чинники надмірного рівня паливно-енергетичних ресурсів на одиницю ВВП у зрівнянні з провідними країнами світу. Дослідження українських спеціалістів, які узгоджуються з експертними висновками експертів міжнародних організацій, показують, що питомі енерговитрати на одиницю ВВП в нашій країні в 2 … 3 рази вище енерговитрат провідних країн [1].

Вказане є чинником необхідності активізації впровадження енергозберігаючих технологій для подолання економічної кризи, руйнації продуктивних сил та соціального збурення в суспільстві. Отже, актуальним питанням є структурна перебудова паливно-енергетичного комплексу для підвищення ефективності генерації і споживання енергії, мінімізації імпорту первинних енергоресурсів (ПЕР) та покращення екологічного стану довкілля. Крім того, Україна, намагаючись інтегруватись у світову економіку, має відповідати міжнародним економічним стандартам, одним з яких є енергетична ефективність, якої, в свою чергу, можна досягти шляхом реалізації раціональних методів технологічного оновлення енергетичного господарства.

Пріоритетним спрямуванням державної політики України є раціональне використання технологічних засад генерації і споживання електрики та теплоти при техніко-економічній доцільності виробництва, на основі економії ПЕР і екологічних вимог, відповідно [2]. В Законах України «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки» і «Про пріоритетні напрями інноваційної діяльності в Україні» зазначено науково-технічні проблеми за напрямками "Збереження навколишнього середовища та сталий розвиток” та “Новітні технології та ресурсозберігаючі технології в енергетиці, промисловості та агропромисловому комплексі” [3].

За ефективністю використання паливно-енергетичних ресурсів, які визначають темпи розвитку та енергетичну незалежність будь-якої країни, в Україні спостерігається є критичний стан із забезпеченням енергетичними ресурсами. Дефіцит ПЕР, який спостерігається в глобальному вимірі, призводить також до підвищення цін на енергоносії і в Україні [1], що вимагає пришвидшення темпів практичної реалізації технологічного оновлення енергетичного сектору економіки за рахунок впровадження інноваційних енергозберігаючих технологій. Слід зауважити, що вказане є стратегічним напрямком для нашої держави, бо існують гострі проблеми із забезпеченням переходу до сталого розвитку енергетики на основі об'єднання енергоефективних технології розосередженої генерації: когенерації, засобів акумулювання енергії, теплонасосних систем, з диверсифікацію первинних джерел енергії, що сприятиме енергетичній безпеці України [4]. Підвищення енергоефективності є важливим для довкілля, бо сприяє скороченню викидів парникових газів в атмосферу. Значний потенціал можливостей для застосування енергоефективних технологій в Україні притаманний саме сфері генерації і споживання енергії.

За оцінкою Світового банку рейтинг країн за ВВП у 2024 році становив: США – 27360000 млн. USD, Китай – 17660000 млн. USD, Німеччина – 4460000 млн USD, Великобританія – 3340000 млн. USD, Франція – 3030000 млн. USD, Україна – 178760 млн USD [5].

Щодо вуглецеємності валового внутрішнього продукту, то Україна майже в 2 рази перевищує світовий показник та у 3,3 рази більше показника країн ЄС.

Імплементація зусиль, які націлені на ефективність використання ПЕР та енергозбереження, за умови покращення якості надання енергетичних послуг, дозволить кумулятивно скоротити до 2050 р. викиди шкідливих речовин на 3677 млн тонн CO_2-екв., а темпи росту викидів парникових газів зменшаться[6].

З огляду на результати моделювання, викиди ПГ у секторах енергетики і промисловому виробництві України до 2050 р. можуть скоротитися до 34% від базового рівня 1990 р, тобто до 260…285 млн тон CO_2-екв., якщо забезпечити

заходи низьковуглецевого розвитку, що сприятиме приросту ВВП і доходів населення [6].

Одним із перспективних шляхів забезпечення енергетичної ефективності в галузі теплоенергетики є впровадження інноваційних систем децентралізованого теплозабезпечення з використанням теплових насосів на базі різнорідних ЗВДЕ та гібридних засобів акумулювання енергії, що потребує вдосконалення схемно-конструктивних і режимних параметрів об'єктів теплопостачання з урахуванням регіонального технічного потенціалу первинних енергетичних ресурсів, в т.ч. різнорідних за здатністю покриття дефіциту одне одного протягом доби, місяця, сезону та року, змінних відновлюваних джерел енергії (ЗВДЕ). При цьому, досягнення умов ефективного перебігу процесів в елементах ДСТ є актуальною науково-технічною задачею, якій присвячено дане дослідження.

При використані різнорідних ВДЕ, здатних компенсувати дефіцит енергії одне одного, в циклі теплового насоса з використанням акумуляторів теплоти, встановлено, що поліструктурне застосування декількох контурів РВДЕ для випарників теплонасосних генераторів теплоти (ґрунтового та сонячного), забезпечить компенсацію добового, місячного, сезонного та річного дефіцит одне одного ВДЕ [7 – 12].

Слід зауважити, що доцільність впровадження ДСТ на базі теплонасосних генераторів теплоти з використанням різнорідних ЗВДЕ та гібридних засобів акумулюванням енергії, стримується, як економічними причинами, а саме, високим рівнем початкових капітальних витрат, так і нерівномірністю технічного потенціалу ВДЕ протягом часу, що можна покращити шляхом впровадження поліструктурних систем теплопостачання [8].

З урахуванням кліматичних умов регіонів України, обов'язковою умовою для використання систем децентралізованого теплопостачання на базі тільки одного ЗВДЕ (моноструктурної схеми), є резервування потужності за рахунок традиційних генераторів теплоти, що суттєво погіршує економічні показники, ставлячи її використання на межу економічної доцільності [9]. Через циклічність природних

властивостей ЗВДЕ протягом довготривалого періоду, вказану задачу необхідно вирішувати шляхом використання РВДЕ.

Вирішити питання конкурентоспроможності систем децентралізованого теплопостачання можна шляхом впровадження поліструктурних систем з використанням теплових насосів, щонайменше на базі двох РВДЕ, які здатні компенсувати дефіцит одне одного, та гібридних засобів акумулювання теплоти. Практична реалізації децентралізованих теплонасосних систем з різнорідними ЗВДЕ і гібридними засобами акумулювання теплоти, здатними до кумулятивного ефекту накопичення теплоти, призведе до підвищення ефективності і надійності теплозабезпечення споживачів, збільшенню частки заміщення викопного палива і покращення стану довкілля , відповідно [9].

Таким чином, впровадження децентралізованих гібридних систем енергозабезпечення з раціональним застосуванням енергетичного потенціалу ЗВДЕ, які дозволяють компенсувати дефіцит одне одного, а також різних засобів акумулювання енергії [9]. В зимовий період, при дефіциті інсоляції, ґрунтова енергія, яка безперебійно надходить до теплового насосу, може покрити дефіцит інсоляції, що призведе до мінімального застосування резервного генератора енергії. Вказаний ефект можна ще більше посилити за рахунок використання гібридних засобів акумулювання теплоти та технічного оновлення стану об’єкту теплозабезпечення шляхом його термомодернізації [10].

Отже, зазначені інноваційні технології децентралізованого теплопостачання, відповідають засадам енергозбереження [11].

Для більш ефективного використання РВДЕ в децентралізованих системах теплозабезпечення необхідно обґрунтувати доцільність використання поліструктурних схем ТНУ на базі РВДЕ та гібридних засобів акумулювання енергії, при застосуванні яких досягається корисний кумулятивний ефект накопичення енергії, що, в свою чергу, збільшує коефіцієнт заміщення викопних ПЕР.

Рішення вказаних проблем базується на теоретичних основ теплотехніки, технічної термодинаміки, процесів тепло- і масообміну із застосуванням

інструментарію моделювання задля оптимізації процесів в елементах поліструктурних гібридних теплонасосних систем з кумулятивним ефектом заміщення традиційних видів палива і покращення стану навколишнього середовища, відповідно.

Навіть, з урахуванням того, що нині собівартість потужності, яка одержана при використанні децентралізованих систем теплозабезпечення (ДСТ) з альтернативними генераторами теплоти на базі РВДЕ, більше ніж у традиційних енергоустановок, вказаний показник можна покращити за рахунок раціонального використання гібридних засобів акумулювання теплоти [12]. Для України доцільним шляхом є використання ДСТ з гібридними засобами накопичення теплоти, де відбувається перетворення взаємно компенсуючого потенціалу РВДЕ [12 – 14].

Розвиток світової енергетики у пріоритетному напрямку генерації енергії з використанням РВДЕ , за стратегією низьковуглецевого розвитку (СНВР), дозволяє покращити енергетичні, екологічні та економічні проблеми сучасності.

Оптимальним шляхом СНВР для України є практична реалізація інноваційних технологій на основі ЗВДЕ [4].

Вибір теми дослідження зумовлений відсутністю інструментарія удосконалення систем децентралізованого теплозабезпечення, з використанням автономних теплогенераторів, різнорідних відновлюваних джерел енергії (РВДЕ) та гібридних засобів акумулювання теплоти, що потребує урахування технічного потенціалу ЗВДЕ і кліматичних відмінностей регіонів практичної реалізації ДСТ.

Таким чином, підвищення ефективності використання децентралізованих систем теплопостачання на основі застосування теплонасосних технологій з РВДЕ та гідридних засобів акумулювання теплоти, є актуальним запитом практики, що є науково-технічною задачею, на розв’язання якої спрямовані основні дослідження дисертації.

Зв’язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана відповідно до планів, затверджених Міністерством освіти і науки України, які виконано в Національному університеті «Одеська політехніка» і є

складовою частиною держбюджетних НДР за темами: НДР 179-41, ДР (№0119U003518) «Забезпечення ефективного функціонування систем теплопостачання будівель громадського призначення. Теоретико-методологічні та практичні аспекти»; НДР 13-40, ДР (№01161U002956) «Розробка методів енергозберігаючого використання традиційних і відновлювальних джерел енергії» та НДР 196-40, ДР 0121U108310 «Розробка ресурсозберігаючих технологій на підставі термодинамічного аналізу».

Мета і завдання дослідження.

Мета дисертаційної роботи полягає у науково-технічному обґрунтуванні умов ефективної реалізації децентралізованих систем теплозабезпечення поліструктурної конфігурації з раціональним використанням теплонасосних генераторів теплоти на базі різнорідних відновлюваних джерел енергії та гібридних засобів акумулювання теплоти для одержання кумулятивного ефекту енергоефективності.

Для досягнення поставленої мети сформульовані наступні *завдання*:

– виконати аналіз поліструктурних технологій теплозабезпечення, визначити методи підвищення їх енергоефективності, зменшення теплового забруднення довкілля шляхом використання інноваційних генераторів теплоти, гібридних засобів акумулювання енергії в системах децентралізованого теплопостачання з раціональним використанням технічного потенціалу РВДЕ, здатних до покриття сезонного дефіциту одне одного, що забезпечить високий коефіцієнт заміщення викопних ПЕР;

– шляхом математичного моделювання обґрунтувати техніко-економічну доцільність інтегрування в поліструктурну систему децентралізованого теплозабезпечення локальних генераторів теплоти на базі теплових насосів, РВДЕ та гібридних засобів акумулювання енергії, для удосконалення заміщуючої спроможності запропонованої інноваційної системи на засадах енергозбереження;

– обґрунтувати умови раціонального використання різнорідних ЗВДЕ для систем децентралізованого теплозабезпечення на основі застосування інструментарію чисельного моделювання теплової і економічної ефективності

ДСТ з використанням сонячних колекторів і акумуляторів теплоти різного типу для попереднього підігріву води в автономному генераторі теплоти, які здатні забезпечити ефективність рішень та раціональні режими функціонування системи;

– запропонувати раціональні схемно-конструктивні рішення та режими роботи системи за результатами чисельного моделювання, які забезпечують доцільність використання гібридних систем теплопостачання з акумулюванням енергії і ЗВДЕ в децентралізованих системах, з урахуванням регіональних можливостей і потреб;

– розробити рекомендації щодо використання отриманих теоретичних та експериментальних результатів для оптимізації параметрів децентралізованих систем з використанням гібридних засобів акумулювання енергії і ЗВДЕ в для об’єктів енергопостачання різного типу.

Об'єктом дослідження є поліструктурна децентралізована система теплозабезпечення з локальними теплогенераторами теплонасосного типу з раціональним використанням різнорідних ЗВДЕ та гібридних засобів акумулювання теплоти для об’єктів теплопостачання різного типу на засадах енергозберігаючих технологій.

Предметом дослідження є процеси в елементах децентралізованої системи теплопостачання з автономними теплогенераторами, різнорідними ЗВДЕ та гібридними засобами акумулювання теплоти, що дозволяє за рахунок кумулятивного енергозберігаючого ефекту вирішити актуальну науково-технічну проблему теплозабезпечення споживачів на засадах енергозберігаючих технологій

Методи досліджень. Використовувались теоретичні та експериментальні методи дослідження як інструментарій для вдосконалення теплових і режимних параметрів об’єкту дослідження.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в обґрунтування ефективної практичної реалізації систем децентралізованого теплопостачання з автономними теплогенераторами, різнорідними за технічним потенціалом ЗВДЕ, з урахуванням кумулятивного ефекту при застосуванні гібридних засобів накопичення теплоти, що базується на засобах чисельного моделювання і експериментальних даних для ля оптимізації режимів роботи параметрів ДСТ і вдосконалення системи, а саме:

– на основі аналізу існуючих технологій енергозабезпечення, визначено шляхи і методи підвищення їх енергетичної ефективності за рахунок використання в системах децентралізованого теплопостачання з локальними теплонасосними установками на базі ЗВДЕ та гібридними засобами акумулювання енергії, що забезпечує збільшення коефіцієнта заміщення традиційних ПЕР і енергозбереження, відповідно;

– запропоновано математичну модель, яка дозволяє визначати доцільність інтеграції в децентралізовану систему теплопостачання теплонасосної генерації теплоти, різнорідних ЗВДЕ та засобів гібридного акумулювання енергії, як інструментарію енергоефективності;

– визначити оптимальні параметри поліструктурних децентралізованих систем теплопостачання з використанням кумулятивного ефекту накопичення теплоти стінами, які сприяють зменшенню теплового навантаження та собівартості генерації теплоти, та не потребують додаткових капітальних внесків.

– визначити ефективність застосування гібридних засобів акумулювання енергії в поліструктурних децентралізованих системах теплозабезпечення з тепловими генераторами теплоти з використанням РВДЕ, які забезпечують високі частки заміщення викопних ПЕР, та сприяють зменшенню теплового навантаження та собівартості генерації теплоти без додаткових капітальних внесків

– розробити рекомендації щодо оптимальних режимів роботи ДСТ з урахуванням досяжного технічного потенціалу РВДЕ та гібридних засобів акумулювання теплоти на основі отриманих теоретичних та експериментальних результатів.

Практичне значення одержаних результатів. Одержаны в дисертаційній роботі результати були використані для широкої низки практичних застосувань. Розроблений інструментарій визначення доцільності практичної реалізації ДСТ на базі теплонасосних технологій з використанням ЗВДЕ та гібридних засобів акумулювання теплоти, має більшу ефективність за низкою енергетичних та техніко-економічних показників, що дозволяє результати досліджень

рекомендувати до широкого кола прикладних завдань для підвищення надійності енергозабезпечення та покращення стану довкілля.

Запропоновані в дисертаційній роботі рекомендації щодо підвищення ефективності децентралізованих систем теплозабезпечення з інноваційними тепло генераторами на базі РВДЕ та гібридними засобами накопичення теплоти використовуються при підготовці при підготовці бакалаврів і магістрів за освітньою програмою «Відновлювані джерела енергії та енергокомплекси» в Українсько-польському навчально-науковому інституті на кафедрі «Теоретичної, загальної та нетрадиційної енергетики» у навчальних дисциплінах І рівня вищої освіти (бакалаврського): «Теплові двигуни енергетичних комплексів», «Моделювання теплових процесів в енергокомплексах» та ІІ рівня вищої освіти (магістерського): «Теплові насоси та кондиціонери», «Інноваційні технології відновлюваної енергетики».

– в науковому парку «Одеської політехніки», за Угодою №1 від 12.03.2021 року з Полонійним університетом, м. Ченстохова, Польща «Про проведення комплексу заходів щодо організації навчання та освітньо-консультативних послуг в період практики за програмою “Подвійний диплом” та при підготовці кваліфікаційних робіт бакалаврів і магістрів.

Особистий внесок здобувача. Основні наукові положення, висновки і рекомендації, що містяться в дисертації та виносяться на захист, отримано здобувачем особисто в період з 2021 по 2025 рік. Список публікацій здобувача за темою дисертації наведено в Додатку А.

Особистий внесок здобувача у наукових працях, які опубліковані у співавторстві:

– у науковій праці [1] здобувачем обґрунтовано умови використання акумуляторів теплоти для більш ефективної реалізації переривчастого режиму опалення, які призводять до корисного ефекту зменшення теплової потужності генератора теплоти за рахунок накопиченої теплоти в ТА при переведені ДСТ в режимі натопу в будівлях громадського призначення, з урахуванням кліматичних умов;

– у науковій праці [2] здобувачем здійснено аналіз результатів теоретичних і експериментальних досліджень автономного генератора теплоти у складі ДСТ, що дозволило визначити СОР, побудувати графіки теплопродуктивності системи при використанні двох РВДЕ, з урахуванням кліматичних умов;

– у науковій праці [3] здобувач визначив умови раціональних поєднання генератора теплоти і акумулятора теплоти, які забезпечують рівномірність поля температур в накопичувачі теплоти при його зарядці і розрядці;

– у науковій праці [4] внесок здобувача полягає у визначені особливостей впливу на розрахункову потужність теплового насосу акумулятора теплоти при різних режимах опалення та доцільність одночасного використанням теплового насосу і котла для різних режимів роботи комбінованої системи теплозабезпечення для кліматичних умов України;

– у науковій праці [5] здобувачем обґрунтовано раціональні шляхи підвищення ефективності ДСТ з використанням ТН на базі різнорідних ЗВДЕ та гібридними засобами накопичення теплоти в БА та огороджуючими конструкціями будівлі з урахуванням кліматичних умов. Виконано аналіз результатів чисельного моделювання, на основі чого розроблені рекомендації щодо для практичного застосування результатів дослідження з обґрунтуванням кумулятивного енергозберігаючого ефекту при використання гібридних засобів акумулювання теплоти;

– у роботах [6 – 11] здобувачем оприлюднено результати пропозицій здобувача, відповідно запиту практики.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і практичні результати дисертаційної роботи доповідалися та одержали схвалення на таких конференціях:

– XXIII International Scientific and Practical Conference “World ways and methods of improving outdated theories and trends”. Zagreb, Croatia, June 11 – 14, 2024. https://isg-konf.com/world-ways-and-methods-of-improving-outdated-theories-and-trends/

– IX International Scientific and Practical Conference “Theory and practice of science: key aspects”. Rome, Italy, February 19-20, 2024. https://doi.org/10.51582/interconf.19-20.02.2024, https://archive.interconf.center/index.php/2709-4685/issue/view/19-20.02.2024/199

– Міжнародна науково-практична конференція “Енергоефективне місто. XXI століття”. Секція: Енергоефективні інженерні системи міст. Одеса, ОДАБА, 10 –11 листопада 2022. https://odaba.edu.ua/upload/files/Zbirnik_Energoefektivne_misto_2022_1.pdf

– XI наукова конференція “Наукові підсумки 2022 року. Харків, Х.: Технологічний центр, 2022. https://entc.com.ua/uk/konferentsii/610-naukovi-pidsumky-roku

– Сергеєв М. І. Перспективи застосування теплонасосних установок в технологічних схемах генерації енергії // https://web.kpi.kharkov.ua/microcad/wp-content/uploads/sites/240/2025/05/Programka-2025.pdf

– XIII International Scientific Conference in Spain “Science and society: tools of modern innovative development. May 06-09, 2025. https://isg-konf.com/science-and-society-tools-of-modern-innovative-development/

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи викладено в 11 публікаціях, 5 статей у наукових фахових виданнях України, 6 публікації – апробаційного характеру: тези доповідей в збірниках праць міжнародних науково-практичних конференцій.

Структура і обсяг роботи. Дисертація складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Повний обсяг дисертації складає 146 сторінок, з них 130 сторінок основного тексту, в т.ч. 34 рисунків на 15 сторінках, 10 таблиць на 5 сторінках, список використаних джерел з 85 найменувань на 12 сторінках і 7 додатків на 22 сторінках.

РОЗДІЛ 1
ОСНОВНІ ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКИ І ПЕРСПЕКТИВИ ВДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ, АДАПТОВАНИХ ДО РИНКОВИХ ЦІН НА ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ

1.1. Особливості світової політики щодо енергоефективності

Політика, яка спрямована на підвищення енергоефективності та енергозбереження є пріоритетною для багатьох країнах світу [4]. Вказане пояснюється тим, що:

– країни-імпортери енергоресурсів стикаються зі змінними ціновими умовами на паливно-енергетичні ресурси (ПЕР), що змушує їх вирішувати проблеми конкурентоспроможності продукції на світовому ринку та розвивати енергозберігаючі технології в ринкових умовах.

– країни-експортери енергоресурсів також спрямовані на енергозбереження для підвищення доходності від реалізації ПЕР.

Через проблему вичерпності запасів ПЕР виникає потреба в значних інвестиційних коштів в розроблення важкодоступних родовищ і розвиток технології на базі змінних відновлюваних джерел енергії (ЗВДЕ), як важливого заходу зниження залежності від імпорту викопних палив. Як свідчить досвід провідних країн світу, що найменше за останні десятки років, було призупинено темпи нарощування споживання ПЕР на душу населення, що посприяло збільшенню якості рівня життя громадян цих країн [5–6].

Спрямування на енергоефективність забезпечує:

– конкурентоздатність економічного розвитку ;

– енергетичну безпеку;

– призупинення темпів кліматичних змін.

Оскільки якість використання ПЕР здійснює величезне впливове значення на рівень якості життя мешканців будь-якої країни світу, то забезпечення надійного,

ефективного і безпечного за техніко-економічними і екологічними показниками енергопостачання, що реалізується на сучасних ринкових засадах, є найважливішим принципом для світової спільноти [7–15].

За прогнозними оцінками СЕР та МЕА вже протягом 2050…2060 років більше половини обсягів енергоспоживання буде заміщуватись за рахунок використання різнорідних змінних за технічним потенціалом ВДЕ [16].

1.2. Енергоефективність секторів економіки України і ЄС

Основними шляхами, що спрямовані на економію ПЕР є [4, 9, 11].:

– перехід на інноваційні технології, які забезпечують сучасний рівень організації генерації енергії, тобто ресурсо- і енергозбереження;

– технічне оновлення енергетичного обладнання на засадах енергозбереження;

– практична реалізація інноваційного обладнання з вдосконаленими режимами роботи, на засадах енергозбереження;

– покращення технологій використання ВЕР;

– використання гібридних технологій генерації та споживання енергії.

Рейтинг енергоефективності регіонів України складемо за даними МЕА. Середня енергоємність секторами економіки європейських країн, яку можна вважати еталоном ефективності споживання енергії, надає можливість для порівняння енергоефективності відповідних галузей в Україні (промисловість, сільське господарство, будівництво, ЖКХ). Так, за даними 2020 р., три найвищі позиції в рейтингу енергоефективності мають такі області: Закарпатська, Херсонська та Вінницька, бо їхні показники відносно ЄС становлять відповідно 62,4%; 64,7% і 65,5%. Найгірші показники в рейтингу мають такі області: Рівненська, Черкаська і Луганська області бо їхні показники відносно ЄС становлять відповідно 38,5%; 43,9% і 44,7%. Середній потенціал енергоефективності промислового виробництва в Україні становить приблизно ~

49 % і стосується переважно металургічної, хімічній галузі, добувної галузей та мінерального неметалевого виробництва [16–17].

За даними МЕА Україна є також найбільш енергомісткою країною в Європі: вдвічі вище від середньосвітового рівня; майже втричі вище ніж у ЄС та у 2,5 рази вище порівняно з Польщею. А споживання природного газу в Польщі в 2,9 рази менше ніж в Україні [16–17].

Скорочення споживання та енергоефективність у 2024 р. є найважливішими заходами державної політики щодо забезпечення доступності енергоресурсів.

Впровадження заходів з енергоефективності в Україні на європейському рівні дозволить зменшити споживання ПЕР у агропромисловому секторі та ЖКХ на 45,8%, де питома вага промисловості та ЖКХ в України становить відповідно 48,0% і 34,9% [18]. На жаль, тільки 5,6 % громадян України скористалися державними програмами енергоефективності; 16,4 % – готові долучитись до таких програм, але не знають про їх існування; 17,5 % – планують скористатися підтримкою; 29 % (близько третини громадян) не зможуть собі цього дозволити, якщо участь у таких програмах передбачатиме збільшення квартплати [18].

Споживання ПЕР поділяють на такі групи: промислову, енергетичну, транспортну і ЖКХ. З прикладу, наведеному в таблиці 1.1, навіть на декількох показниках явно видно, що Україні відстає від провідних країн світу [19 –20].

Таблиця 1.1 – Порівняльні дані енергоємності ВВП на одну особу [10]

Країна	ВВП, US$	ПЕР, т.н.е	Енергоємність ВВП, кг н.е / US$	Споживання, МВт·год/особу
Україна	1910	3,29	1,720	3,85
Фінляндія	18850	5,95	0,320	12,9
Німеччина	25580	4,10	0,160	5,62
США	25880	7,9	0,305	11,7

Зазначимо основні напрямки енергозбереження, які реалізуються за рахунок:

– інноваційних підходів до використання ПЕР, що дозволить зменшити потребу на 10–12 %.

– впровадження енергозберігаючих технологій, процесів, пристроїв та лічильників, що дозволить зменшити потреби в енергії на 25–30 %.

– структурної перебудови економіки, що дозволить збільшити частку неенергоємних галузей.

Наведемо порівняння розміру споживання енергоресурсів на одну особу: середній показник для Європи наприкінці XX ст. становив 5600 кВт·год н. А у Франції, де чисельність населення до війни була приблизно така сама, як і в Україні, цей показник становив 8200 кВт·год/рік. Щодо України, то розмір споживання енергоресурсів на одну особу щороку зменшуєтьс, отже, актуальним є необхідність підвищення зазначеного показника, на що і спрямована Національна програма розвитку енергетики, згідно якої питоме споживання ПЕР має досягти 4800 кВт·год, але навіть цей показник – це лише 87 % від рівня 1990 р. [19–20]. Слід наголосити, що чим менше ВВП на одну особу, тим більшою є енергоємність і навпаки, що висвітлено на рисунку 1.1.

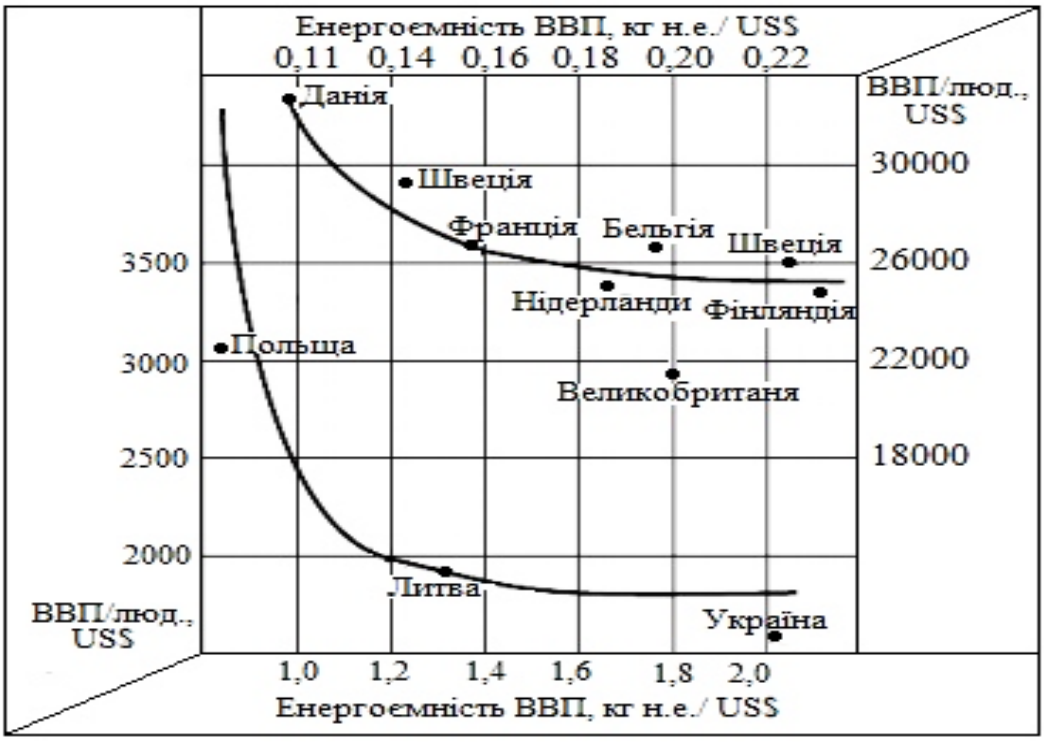

Рисунок 1.1 – Порівняння енергоємності та рівня економічного розвитку України та європейських країн [20]

Аналіз енергоспоживання на душу населення за останні 20 років дозволяє зробити висновок, що ВВП/люд. – є показником добробуту і життєвого рівня будь-якої країни країн є досить усталенною характеристикою, бо для більшості країн цей показник у відсотках становить 5 % від середнього значення [20]. З урахуванням цього зростає необхідність заміщення традиційних ПЕР альтернативними, в т.ч. РВДЕ. Раціональне використання заміщуючих можливостей РВДЕ є важливим напрямком державної політики України задля її енергетичної безпеки.

1.3. Аналіз сучасного стану енергоспоживання і енерговитрат в Україні

1.3.1. Структура енергоспоживання за основними секторами економіки України

Україна – одна з країн світу, де рівень енерговитрат надзвичайно високий. Її частка в світовому споживанні енергії складає 1,9 %, в той час як частка мешканців становить 1% населення світу. За структурою енергоспоживання неефективність для України спричиняється такими факторами: незбалансованим за структурою енергоспоживанням та недосконалістю використання енергії в різних секторах її економіки [22 – 23]. Основними проблемами енергетики України є:

– невиправдано надмірно високий рівень енергоємності;

– невиправдана надмірно висока залежність від імпорту викопних ПЕР;

– невиправдано низький рівень ефективності використання енергії;

– обмежені власні запаси викопних ПЕР, недостатні гідроресурси і недостатні запасам ядерного палива;

– надмірно висока ціна викопних ПЕР, яка наближена до рівня світових цін.

1.3.2. Структура енергоспоживання в житлово-комунальному секторі економіки України

Житлово-комунальне господарство (ЖКГ) України за обсягами споживання

ПЕР займає третю сходинку після металургійного та хімічного сектору, а за споживанням теплоти ЖКХ займає перше місце.

При цьому, технічний стан енергетичного обладнання сектору ЖКГ є незадовільненим і з часом ця тенденція досягне критичного стану з ресурсної точки зору, бо 50 % генераторів теплоти функціонують більше 20 років, вони є малоефективними, бо мають ККД менше 82 % [22].

Теплові мережі, довжина яких перевищує 3 тисяч км, перебувають в аварійному стані, а це становить > 14 %. Понад 7,6 тисяч км теплових мережі, що становить > 35 % є зношеними. Переважну більшість теплових пунктів складають застарілі кожухотрубні теплообмінники з надмірно низькими коефіцієнтами теплопередачі. Кумулятивні втрати теплоти в секторі житлово-комунального господарства є надмірними і становлять 30 % [22 – 23].

Серед головних впливових чинників, які визначають кризову ситуацію у житлово-комунальному секторі України треба відзначити такі:

– загальнодержавні (економічна криза та руйнівні наслідки війни);

– низька фінансова стабільність підприємств та населення;

– недосконаліть тарифної системи для розрахунків за користування енергоресурсами;

– прогалини законодавства України, що ускладнює економічні аспекти для стимулювання заходів, спрямованих на енергоефективність і енергозбереження;

– затримки зі сплатою за спожиті ПЕР;

– надмірна централізація систем теплопостачання, функціонування енергетичного обладнання, яке відпрацювало ресурс часу та є малоефективним;

– неузгодженість ринкових цін на енергоефективне обладнання та сервісних послуг на забезпечення належного ефективного енергопостачання [23].

Таким чином, розглянуту проблему можна назвати умовно «3-Е», що містить три складові компоненти, які нерозривно пов’язані міх собою: «енергозбереження –економіка – екологія».

1.4. Аналіз стану теплозабезпечення об’єктів промислової і малої енергетики України та світу

1.4.1. Причини критичного перегляду концепція переваги централізованого теплопостачання як єдиного напрямку розвитку теплоенергетики

Теплоенергетика України сформувалася за концепцією переваги централізованого теплопостачання з усіма, притаманними цій концепції перевагами, а також і недоліками цієї концепції, які значно посилились протягом довготривалої експлуатації:

– погіршення стану теплових мереж;

– затримка розвитку інноваційних технологій, в т.ч. когенераційних, в застарілих схемах теплозабезпечення ;

– затримка впровадження сучасних систем контролю, обліку і керування в застарілих схемах теплозабезпечення;

– недостатність викопних паливних ресурсів та затримка впровадження технологій, які базуються на диверсифікації ПЕР;

– необхідність забезпечувати зростання потреб споживачів в теплоті з одночасним розв'язанням екологічних проблем при наявності високого рівня зношеності енергетичного обладнання ДСТ, як основного, так і допоміжного.

В цих умовах необхідно критично переосмислити концепцію ДСТ, як єдино слушного напрямку розвитку, з урахуванням сучасного розвитку інноваційних технологій, ринкових умов, диверсифікації ПЕР і стану матеріальної бази, задля удосконалення теплозабезпечення споживачів на основі:

– впровадження інноваційних рішень, які відповідають вимогам ефективності, надійності та екологічним вимогам;

– зниження рівня енергоспоживання шляхом впровадження технологій обліку витрати теплоти та сучасних методів контролю й автоматизації теплових процесів;

– забезпечення реалізації раціональних умов для використання децентралізованих систем теплопостачання на базі автономних генераторів теплоти, РВДЕ, гібридних засобів кумулятивного накопичення теплоти при належному стані термомодернізації.

Слід зауважити, що цілковитий перехід на децентралізоване теплопостачання в умовах України, для якої характерна централізована інфраструктура, може призвести до зменшення їх робочих потужностей, ККД та підвищення експлуатаційних витрат через складнощі регулювання гідравлічних систем, що може виявитись проблематичним, якщо не враховувати вказані чинники впливу.

Цьому питанню в дисертації, в розділах 3 і 4, приділено особливу увагу, із запропонуванням інструментарій диверсифікації ПЕР, які використовуються для генераторів теплоти, що працюють сумісно з сонячними колекторами, які використовуються як теплообмінники попереднього підігріву води для котлів, із застосуванням різного типу акумуляторів теплоти, та резервуванням потужності від декількох різнорідних ВДЕ.

1.4.2. Доцільність концепції централізованого теплопостачання протягом довготривалого періоду експлуатації

В Україні загальна протяжність теплових мереж (ТМ) ЦСТ в 2016 р. становила 28 тис. км у двотрубному обчисленні, а в 2017 році – 20, 1 тис. км. Тобто за один рік протяжність скоротилась на 7,9 тис. км (26 %).

Станом на 01.05. 2018 р. протяжність дещо збільшилась – до 20,6 тис км або на 25 %, що пояснюється прийняттям на баланс підприємств теплопостачання міст теплових мереж (ТМ), які не мали офіційного власника. Частка аварійних теплових мереж становить 38%, а це понад 7,5 тисяч км, а кількість їх поривів ТМ сягає декілька десятків на добу [24].

Середні втрати теплоти в теплових мережах у 2017 р. становили 15 %, а до 2018 р. досягли 19 %. При цьому максимальні втрати сягають 40 % і навіть більше. У

2010 році рівень забезпеченості населення централізованим теплопостачанням становив ~ 60 % і наша країна входила до складу лідерів використання ЦСТ у Європію. У 2016 р. цей рівень становив вже 54 %, а у 2017 р. – 52 %. Станом на 01.05.2018 р. до ЦСТ підключено 83590 житлових будинків багатоквартирного житлового фонду з 163041 існуючих. Таким чином, загальна частка забезпечення ЦСТ житлових будинків становила 51,3 % [24].

При цьому, тенденція до зменшення частки ЦСТ характерна, як у великих, так і у невеликих містах. В Україні щорічно від'єднуються від ЦСТ понад 2000 багатоквартирних будинків (ББ). Наприклад, з 85809 будинків із ЦСТ у 2016 р. від'єднались 2125. Багато міст повністю відмовились від ЦСТ і перейшли на ДСТ (Ужгород, Марганець, Нікополь, Покров, Золочів, Долина). З поміж 83590 будинків, підключених до ЦСТ, послугами централізованого гарячого водопостачання (ЦГВП) користуються 34464 житлових ББ житлового фонду або 41,2 %. В Україні всього 18 міст зберегли функціонування ЦГВП. Зношення мереж ЦГВП становить 80 %. Рівень забезпечення ЦСТ бюджетних установ ще нижчий. До ЦСТ підключено 16267 будівель бюджетних установ із 39376 або 41,3 % (рисунок 1.2) [24]. При цьому, послугами ЦГВП забезпечено 5728 будівель бюджетних установ із 16267 установ, підключених до ЦТ, або 35,23 % (рисунок 1.3) [24]. Усереднений рівень оснащення житлових ББ в Україні, підключених до систем ЦСТ, приладами обліку теплоти (ПОТ) – 80 % (64268 будинків із 80293). Усереднений рівень оснащення будівель бюджетних установ загально-будинковими ПОТ є дещо вищим і сягає 89 % (17075 із 19201). Слід зауважити, що більшість вузлів теплової енергії (ТЕ) в будівлі не оснащені засобами регулювання теплового навантаження [24].

1.5. Перспективи використання технологій автономного теплопостачання з використанням низькопотенційних вторинних та змінних відновлюваних джерел енергії

В останні роки величезна увага приділяється генераторам енергії для індивідуального використання, в т.ч. з теплонасосними установками різного типу

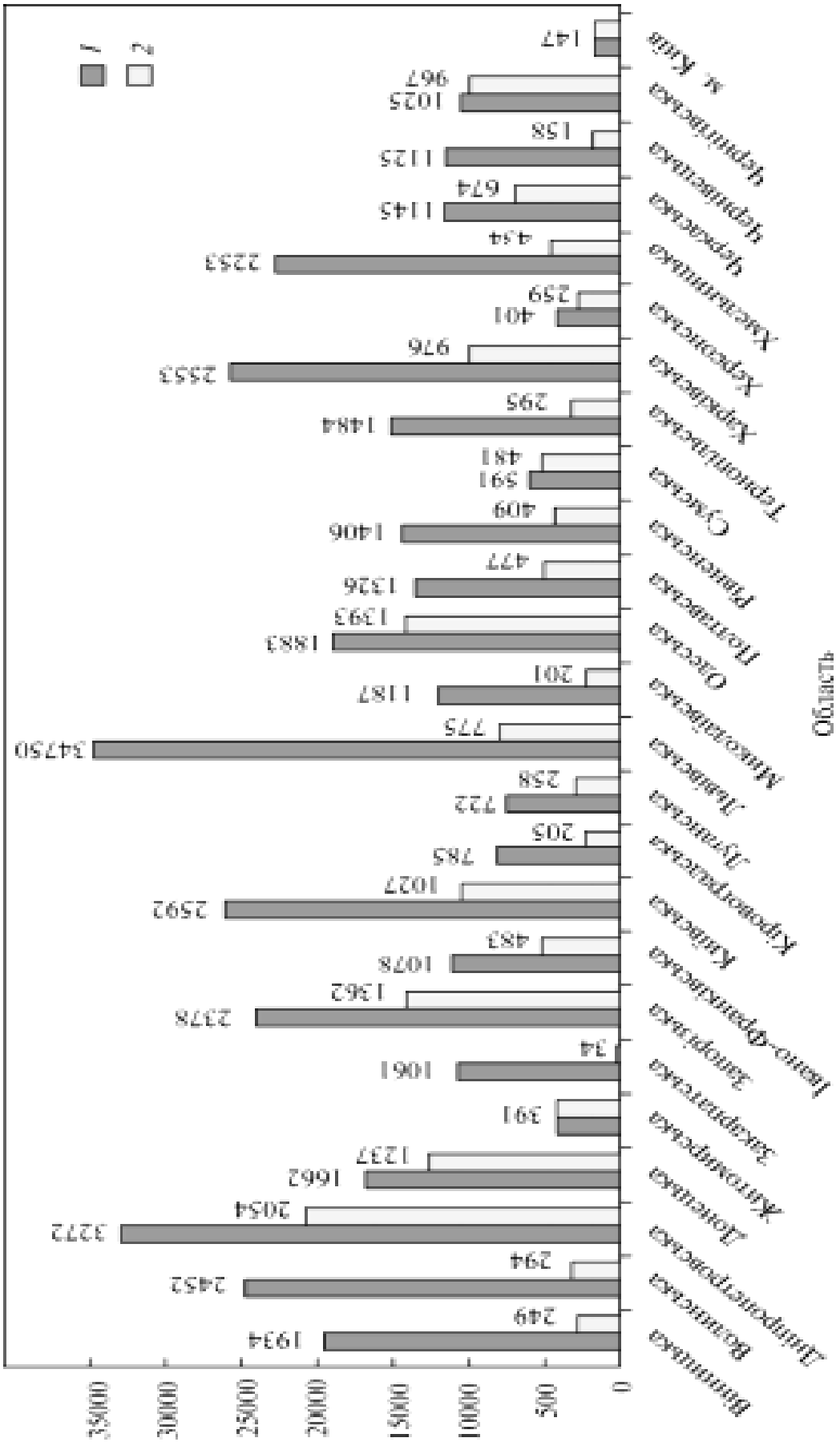

Рисунок 1.2 – Забезпечення бюджетних закладів ЦСТ, одиниць: 1– бюджетні заклади (освіти, медичних, соціальних); 2 – кількість таких закладів які забезпечуються опаленням від ЦСТ [24]

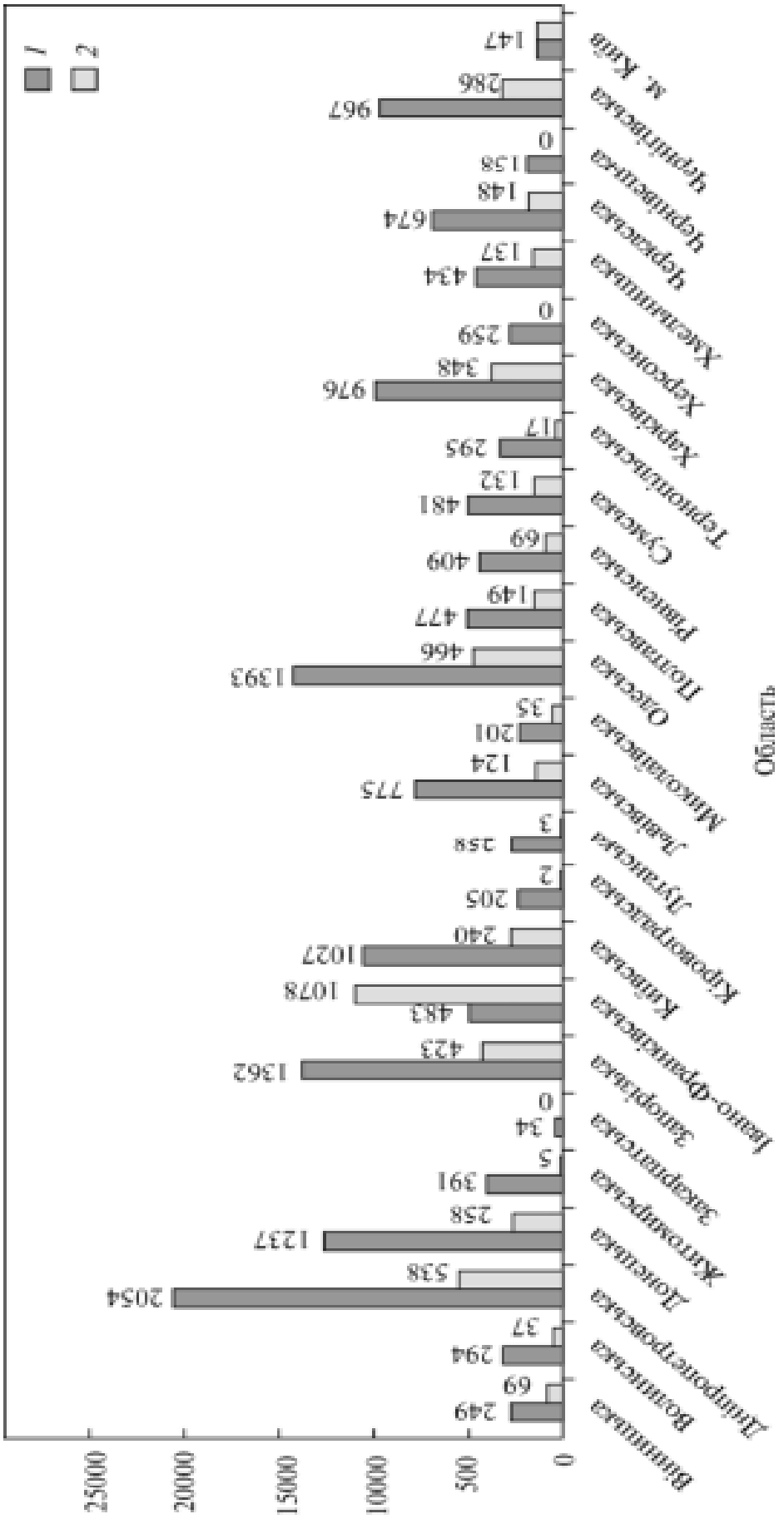

Рисунок 1.3 – Забезпечення бюджетних закладів централізованим ГВП, одиниць: 1– бюджетні заклади (освіти, медичних, соціальних), які підключені до ЦСТ; 2 – кількість таких закладів, які забезпечуються ГВП [24]

на базі декількох РВДЕ [9–13].

Використання ТН дозволяє більш ефективно забезпечувати потреби споживачів у теплоті та холоді на базі диверсифікації ПЕР, в т.ч. декількох різнорідних за фізичною властивістю і технічним потенціалом ВДЕ, які в безупинно зростають і мають тенденцію до зростання в довгостроковій перспективі [13, 26–28].

Європейською Комісією затверджено Енергетичну стратегію ЄС до 2030 року, яка передбачає: зниження викидів шкідливих речовин в довкілля на 40%, підвищення енергоефективності на 27%, а також зростання обсягів використання ВДЕ в енергетиці до 27%, що суттєво перевищують рівень показників минулої Енергетичної стратегії (ЕС), яка діяла до 2020 року. Особливістю нової ЕС є спрямування на потреби споживачів, а не тільки на генерацію енергії [29]. Згідно прогнозам Світового енергетичного комітету до 2020 р. 70% комунального та промислового теплопостачання в розвинутих державах буде здійснюватися за допомогою теплових насосів (ТН). Цей прогноз в значній мірі є реалізованим. Наприклад, продажі теплових насосів в Європі за 2022 рік зросли на майже 38 % і досягли приблизно 3 мільйонів одиниць. Загальна кількість підключених теплових насосів різного типу (повітря-повітря, вода-вода, грунт-вода тощо), і насосів для ГВП в Європі становить близько 20 мільйонів. Це говорить про те, що теплові насоси забезпечують опалення для ~16% житлових і комерційних будівель в Європі (рисунок 1.4). В 2023 р. в 14 країнах Європи було продано 2,8 мільйона теплових насосів. Але у 2024 р. продажі теплових насосів у 14 країнах Європи впали на 21% порівняно з 2023 роком. У США продаж теплових насосів зросли до 4323728 одиниць у 2022 році по зрівнянню з 1697796 одиницями в 2012 р. [29].

Комісією Європейської Економічної Спільноти (ЄЕС) виконаний аналіз систем теплозабезпечення, в т.ч. з реалізацією ТН, характерних для Європи, (таблиця 1.2), звідки видно, що Україна не досягла в цьому напрямку передових країн світу, що також візуалізовано на рисунку 1.4. Вказана ситуація негативно віддзеркалюється на рівні енергозалежності нашої країни, яка спрямована на членство в ЄС.

Таблиця 1.2 – Показники ефективності і екологічності системи при використанні різних типів теплогенераторів, в т.ч. теплових насосів [26 – 28]

№	Особливості системи з різними типами генераторами теплоти	Енергоефективність ПЕР, %	Викиди CO_2, кг/кВт
1	Електроопалення	35	0,55
2	Теплогенератор на рідкому паливі для опалення і ГВП	80	0,29
3	Теплогенератор на природному газі для опалення і ГВП	80	0,21
4	Конденсаційний теплогенератор на природному газі для опалення і ГВП	95	0,19
5	Система електро- і тепло-забезпечення та холодопостачання	100	0,1
6	Тепловий насос з електроприводом	110	0,22 … 0,14
7	Абсорбційний тепловий насос	130	0,17
8	Тепловий насос з приводом від газового двигуна	150	0,12

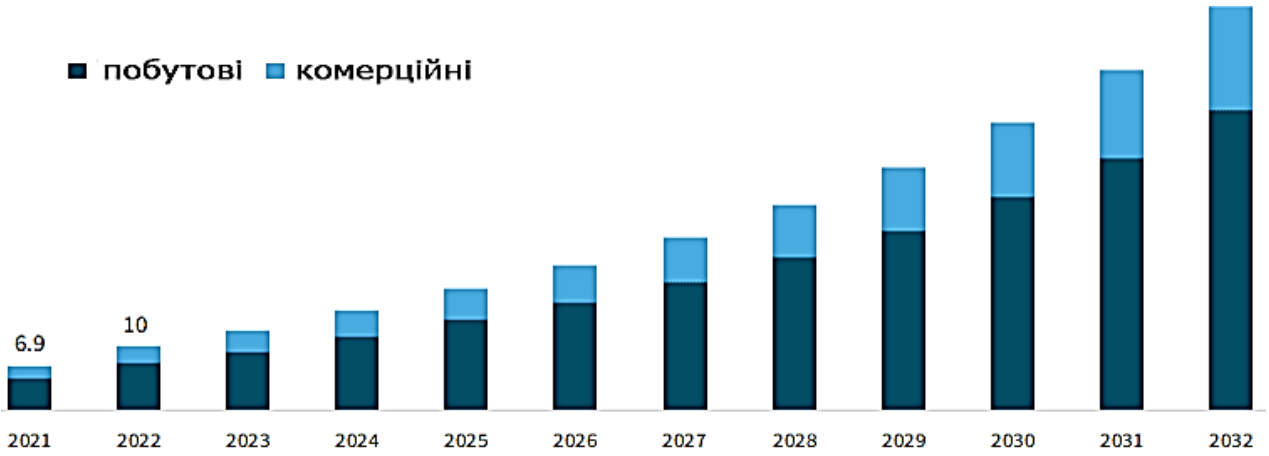

Рисунок 1.4 – Європейський ринок ТН до 2024 р.
та прогнози зростання попиту на ТН до 2032 р, млрд. US$ [29]

Таким чином, збільшення частки використання систем теплопостачання, які функціонують на базі диверсифікації ПЕР [30], в т.ч., з використанням технічного потенціалу РВДЕ, є важливою стратегічною задачею, яка спрямована не тільки на

удосконалення структури паливно-енергетичного комплексу України, а й на зменшення негативного впливу генерації теплоти на довкілля.

1.6. Шляхи вдосконалення систем теплозабезпечення в умовах зміни цін на джерела енергії

Розглядаючи досвід реалізації стратегічних цілей європейського законодавства щодо енергоефективності, наприклад, Директиви з енергоефективності Німеччини, виявлено, що енергоспоживання будівель сектору ЖКХ вдалось знизити з річного рівня 265 до 50 кВт·год/м^2, а в ряді випадків, навіть ще більше – до 15 кВт·год/м^2 на рік, що показано на рисунку 1.5.

На цьому рисунку верхня ступінчаста лінія показує максимально допустимий рівень енергоспоживання, а середня лінія – фактичні значення енергоспоживання при використанні інноваційних рішень. Нижня лінія показує найвищий рівень енергетичної ефективності реалізації забезпечення споживачів енергією.

В даний час характерними є такі загальні закономірності розвитку енергозабезпечення, які спостерігаються в більшості країн світу:

– зростаючий вплив забезпечення енергією на економічний ріст;

– підвищення впливу енергії на формування структури енергобалансу.

Обидві ці закономірності виявляються в зростанні річного вироблення енергії на душу населення (рисунок 1.6) і безперервному росту коефіцієнта забезпечення енергією, що характеризує відношення обсягу споживаної об'єктом енергії до загального споживання всієї підведеної енергії.

Слід зазначити, що питоме енергоспоживання (на 1 м^2 споруди) для муніципального сектору в Україні перевищує 250 кВт·год/рік, що характеризує низький рівень енергоефективності усіх видів будівель та призводить до надмірних витрат ПЕР на теплопостачання. Для порівняння, цей питомий показник, усереднений для країн ЄС становить ~120 кВт·год/рік [29].

Рисунок 1.6 – Потреби в енергії житлового сектору до і після реалізації Директиви з енергоефективності Німеччини [15]

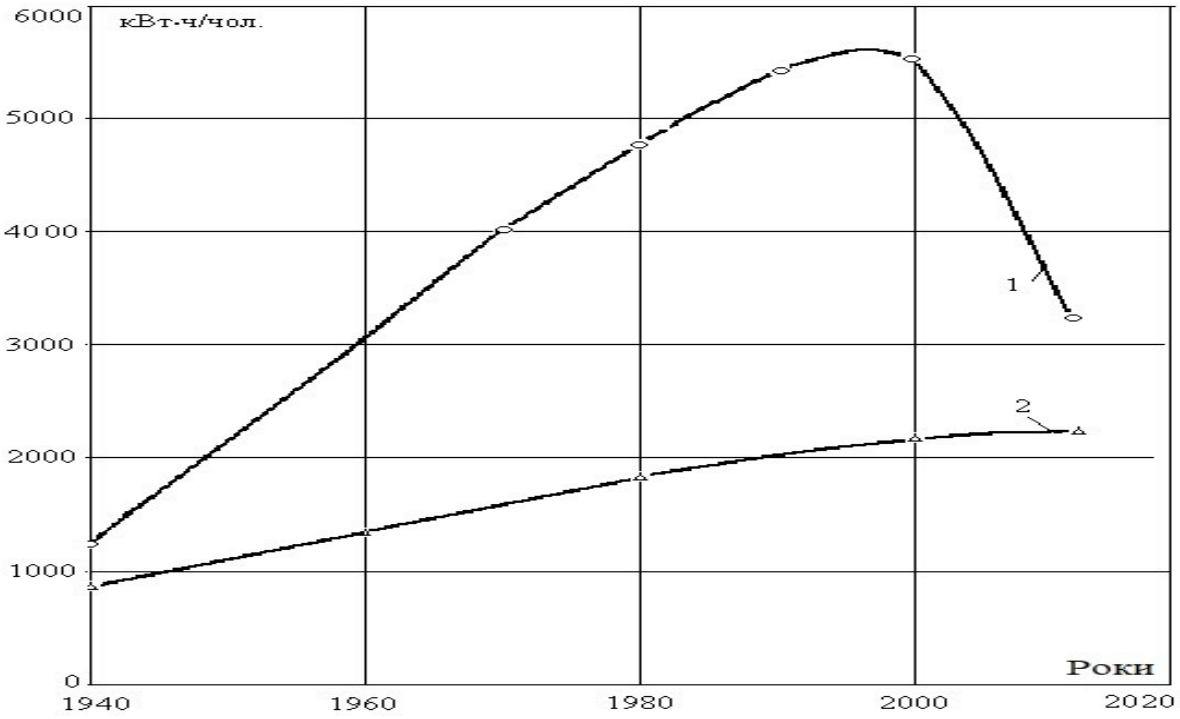

Рисунок 1.7 – Динаміка виробництва енергії на душу населення
1 – в Україні; 2 – у світі

Отже, надмірний рівень енергоємності економіки є стимулом для пришвидшення темпів практичної реалізації енергоефективних технологій в теплоенергетиці, що забезпечить формування бази для інноваційного розвитку паливно-енергетичного комплексу України на прикладі розвитку передових країн світу.

1.7. Моделювання темпів використання палива в енергетиці

Широкомасштабна світова паливно-енергетична криза загострила питання щодо необхідності вивчення енергобалансу регіонів світу та України на довгострокову перспективу та надання оцінки періоду, на який людству вистачить органічного палива. З точки зору провідних експертів світу кількість різних видів енергії, що використовується в енергетиці, і стан технологічного виробництва визначають обсяг добичі палива. Саме зміна в часі вказаних чинників впливає на темпи використання палива. Для моделювання і прогнозування темпів використання палива використано методику [16],згідно якої для оцінки росту потреб в енергії треба враховувати річне зростання чисельності населення *a* (%) і зміни споживання енергії на одного мешканця *b* (%). Збільшення використання енергії можна відповідає рівнянню геометричної прогресії: $E_n = E_0 \cdot q^n$, де E_0 і E_n – споживання енергії в базовому та в n-ому році, відповідно; *n* – число років використання викопного палива. $q=(1+a/100)\cdot(1+b/100)=1{,}201$ – залежить від коефіцієнтів *a* і *b*.

Сумарне споживання енергії:

$$E_{sum} = E_0 (1+\ldots+q^n) = E_0 [(q^{n+1}-1)/(q-1)] \ .$$

Результати розрахунку представлені в таблиці 1.3, якщо *a* =1 % та *b* =1 % з формули (1.2) для *n* = 20 років: $E_{sum}/ E_0=25{,}81$.

Для визначення граничного року споживання традиційного викопного палива при різних темпах приросту населення *a* та рівня споживання енергії *b*:

$$N^{гран} = \frac{\ln\left[1 + \frac{E_{sum}}{E_o}(q-1)\right]}{\ln q} .$$

Результати розрахунків представлені в таблиці 1.4.

Аналіз результатів розрахунків (таблиця 1.4), дозволили встановити граничний строк споживання викопного палива при різних темпах росту споживання енергії однією особою *(b)* та темпах росту чисельності населення *(a)*.

Таблиця 1.3 – Результати розрахунків E_{sum}/ E_0

a / b	-2,0	-1,5	-1,0	- 0,5	0	0,5	1,0	1,5	2,0
1,0	18,99	19,95	20,97	22,07	23,24	24,48	25,81	27,23	28,74
1,1	19,17	20,14	21,18	22,29	23,48	24,74	26,09	27,52	29,06
1,2	19,35	20,34	21,40	22,52	23,72	25,00	26,37	27,82	29,38
1,3	19,54	20,54	21,61	22,75	23,97	25,26	26,65	28,13	29,70
1,4	19,73	20,74	21,83	22,98	24,22	25,53	26,94	28,43	30,03
1,5	19,92	20,95	22,05	23,22	24,47	25,80	27,23	28,75	30,37
1,6	20,11	21,16	22,27	23,46	24,73	26,08	27,52	29,06	30,71
1,7	20,31	21,37	22,49	23,70	24,99	26,35	27,82	29,38	31,05
1,8	20,51	21,58	22,72	23,94	25,25	26,64	28,12	29,70	31,40
1,9	20,71	21,79	22,95	24,19	25,51	26,92	28,43	30,04	31,75
2,0	20,91	22,01	23,19	24,44	25,78	27,21	28,74	30,37	32,11

Таблиця 1.4 – Граничний строк споживання викопного палива

a/100	b/100	1+a/100	1+b/100	q	E_{sum}/E_o	$N^{гран}$
0,010	-0,015	1,010	0,985	0,995	10,721	10,0
0,010	-0,010	1,010	0,990	1,000	20,979	20,0
0,010	-0,005	1,010	0,995	1,005	33,416	30,0
0,010	0,000	1,010	1,000	1,010	50,375	40,0
0,010	0,005	1,010	1,005	1,015	75,893	50,0
0,010	0,010	1,010	1,010	1,020	117,747	60,0
0,010	0,015	1,010	1,015	1,025	192,175	70,0
0,010	0,020	1,010	1,020	1,030	335,558	80,0
0,010	0,025	1,010	1,025	1,035	635,310	90,0

1.8. Висновки до розділу 1

Узагальненні проблеми, що притаманні централізованих систем теплопостачання, є мотивацією для їх децентралізації з використанням різнорідних ЗВДЕ і гібридних засобів акумулювання теплоти:

– з 20000 км теплових мереж, які експлуатуються в Україні, 38 % знаходяться в аварійному стані. Практично в усіх регіонах України строк експлуатації понад 50

% ТМ перевищує 20 років. Втрати в теплових мережах дорівнюють 19 %, що на 6 % перевищують нормативні показники;

– втрати теплоти в теплових мережах ЦСТ визначаються переважно розрахунковим шляхом, при відсутності належного контролю теплотворної здатності природного газу, який використовується в котельнях, та при відсутності урахування фактичного теплового балансу системи;

– влітку, коли теплове навантаження, яке визначається ГВП, знижується в 3…4 рази, відносні теплові втрати в теплових мережах збільшуються до 40 %,%;

– в більшості ЦСТ застосовується променева конфігурації ТМ, яка на відміну від кільцевої, призначена для роботи з одним джерелом теплоти;

– необхідність залучення значних фінансових ресурсів, які в багато разів перевищують бюджети розвитку регіонів та великі терміни окупності капітальних витрат (10…20 років).

Таким чином, запитом практики є синтез, аналіз і оптимізація схемних і структурних рішень, спрямованих на використання ефективних систем децентралізованого теплозабезпечення з використанням змінних РВДЕ та гібридними засобами використанням акумулювання теплоти, адаптованих до ринкових умов зміни співвідношення цін на джерела енергії.

РОЗДІЛ 2
ІНСТРУМЕНТАРІЙ ВДОСКОНАЛЕННЯ ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНИХ СИСТЕМ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ, АДАПТОВАНИХ ДО РИНКОВИХ ЦІН НА ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ

2.1 Особливості існуючої методики визначення економічних та екологічних ефектів використання ЗВДЕ і гібридних засобів акумулювання теплоти

Оцінка існуючої методики яка спрямована на комплексне вирішення питань, пов'язаних з підвищенням ефективності децентралізованого теплозабезпечення на засадах енергозберігаючих технологій, економії ПЕР за рахунок використання змінних відновлюваних джерел енергії (ЗВДЕ) та гібридних засобів акумулювання теплоти, що охоплює сучасні знання у сфері:

– моделювання енергетичних процесів, які притаманні об’єкту теплозабезпечення;

– режимів роботи систем децентралізованого теплопостачання (СДТ) з урахуванням технічного потенціалу ЗВДЕ і засобів акумулювання теплоти;

– результатів і критерії кількісної та якісної оцінки використання енергії в ОТ та пов'язані з цим техніко-економічні і екологічні наслідки;

– оптимізації рішень, пов'язаних з використанням ЗВДЕ і засобів акумулювання теплоти.

2.2. Аналіз існуючих методів моделювання об’єкта теплозабезпечення

Аналіз існуючих методів моделювання об’єкта теплозабезпечення включає спрощений і балансовий метод визначення енергетичного попиту, принципи та приклади моделювання об’єкту теплозабезпечення з використанням диференційного методу елементарних залишків і програмних прикладних пакетів CFD-Fluent, RETScreen Expert, Solid Works, OZE [31–34].

Вказано діапазони придатності окремих методів визначення теплової потреби та математичного моделювання будівель. Стосовно проблем існуючих

технічних рішень енергоспоживання населення, було зазначено вплив конструктивних рішень будівлі на потенціал використання ВДЕ, а також варіанти використання ВДЕ для цілей опалення, підготовки гарячої води, приготування їжі та освітлення. У свою чергу, при обговоренні принципів моделювання обладнання та установок для використання РВДЕ, розглянуті проблеми, що пов'язані з: тепловими насосами, що працюють з використання ґрунтової енергії, з сонячними колекторами, фотоелектричними елементами, вітровими турбінами та когенераційними системами, що живляться біопаливом.

Щодо оцінки енергетичних показників і критеріїв, то запропонована методика визначення та визначено доцільність використання наступних показників:

– енергетична та ексергетична ефективність,

– кумулятивна енергоємність та ексергоємність,

– енергетична ефективність процесів у об’єкті теплозабезпечення: ЕК – потреби в кінцевій енергії та ЕП – потреби в ПЕР.

Крім зазначених параметрів необхідним є визначення економічних чинників використання РВДЕ та гібридних засобів акумулювання теплоти та показників, які містять фактор часу.

Серед найбільш впливових показників розглядаються: термін окупності, норма прибутку, тест першого року.

Для урахування впливу часу застосовуються такі чинники: чиста приведена вартість, внутрішня норма прибутку. Крім того враховувати такі показники, як: індекс чистої поточної вартості; коефіцієнт вартості; індекс прибутковості; зміна внутрішньої норми прибутку; період окупності (для дисконтованих потоків).

Мають також бути враховані показники, які використовуються для оцінки економічної ефективності енергозберігаючих пропозицій: показник економії коштів та показник коштів від економії енергії.

Важливим аспектом є результати оцінки екологічних наслідків (викиди CO_2), які пов'язані з використанням РВДЕ для теплозабезпечення споживачів. З цією метою застосовується аналіз повного життєвого циклу (Life Cycle Assessment) для оцінки екологічної ефективності кумулятивних процесів. Враховуючи специфіку збільшення частки енергії РВДЕ для систем теплозабезпечення, виникає питання, яке полягає в необхідності оцінки не тільки технічних аспектів, а й у визначені ефектів, які можна оцінити тільки кількісно за методом експертних оцінок.

Останні два підходи до дослідження присвячені методам одно- та багатокритеріальної оптимізації. В рамках проведених аналізів з одно-критеріальної оптимізації, наведено принципи формування оптимізаційного завдання, використання обмежень рівності для зменшення кількості параметрів досконалості та декомпозиції задачі оптимізації. Застосування методів оптимізації здійснюється на основі вхідних даних: середніх значень; статистичних розподілів цих даних; даних, які характеризують очікуване значення і середнє відхилення); методів мозкового штурму.

2.3. Методика та алгоритм визначення енергетичних потреб об'єкту теплопостачання

Для оцінки потреби в теплоти для опалення та вентиляції може бути використана методика [35], відповідно до якої максимальна потреба в теплоті визначається за формулою:

$$Q_n = [k_m \cdot (A/V) + 0{,}34\ n] \cdot V \cdot \vartheta \ , \qquad (2.1)$$

де Q_n – максимальна потреба в теплоті, Вт;

k_m – середній коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м^2·К);

A – загальна зовнішня площа будівлі, м^2,

V – загальний об'єм будівлі, м^3;

t_a –внутрішня температура в приміщенні, ^{o}C;

t_z – зовнішня температура, ^{o}C;

$\vartheta = t_a - t_z$ – різниця температур, ^{o}C;

n – кратність вентиляції, год$^{-1}$.

Величину коефіцієнта теплопередачі k_m можна визначити графоаналітичним методом (рисунок 2.1):

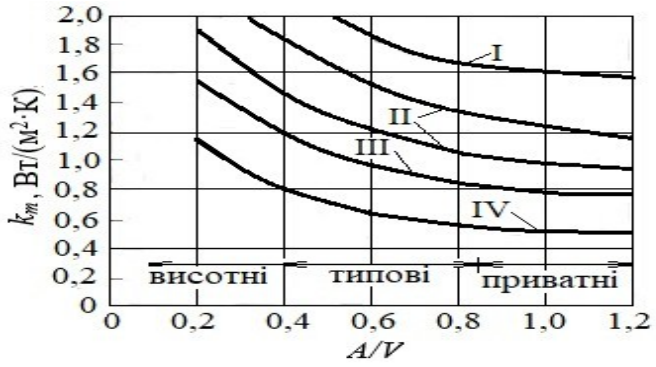

Рисунок 2.1 – Залежність коефіцієнта теплопередачі k_m від параметра і типу будівель A/V [33]*:* IV– найвищий рівень термомодернізації; III – покращена теплоізоляція; II — будівлі до 1976 р.; I – старі будинки

Потреба в енергії для опалення та охолодження є важливою характеристикою енергоефективності будівель. Вона залежить від зовнішніх кліматичних умов, параметрів мікроклімату в приміщенні, розміру і форми будівлі, а також геометричних характеристик і теплоізоляційних властивостей зовнішніх стін.

Індекс споживаної теплоти для опалення житлових будинків розраховується відповідно до державного стандарту показників енергоефективності.

Для розрахунків будівля ділиться на зони, кожна з яких включає:

– опалювальні приміщення, де підтримується розрахункова внутрішня температура повітря в приміщені;

– неопалювальні приміщення, де температура внутрішнього повітря в приміщенні розраховується за тепловим балансом.

Сезонна потреба в теплоті для опалення Q_h в кожній окремій j-й зоні будівлі розраховується як різниця теплових втрат і теплоти, що надходить від сонячного випромінювання і внутрішніх джерел, з урахуванням коефіцієнта використання теплоти, що надходить, за формулою:

$$Q_h = \Sigma(Q_z + Q_w + Q_g + Q_a - \eta_m(Q_{sw} + Q_i)) \text{ , ГДж/рік} \qquad (2.2)$$

де Q_z – втрати теплоти крізь зовнішні перегородки, що контактують із зовнішнім повітрям, для m-ого місяцю сезону опалення;

Q_w – втрати теплоти крізь внутрішні перегородки, які відносяться до прилеглих приміщень з різною внутрішньою температурою: від температури *i*-ої внутрішньої зони, для *m*-ого місяця сезону опалення;

Q_g – втрати теплоти крізь підлогу до ґрунту для m-ого місяця сезону;

Q_a – втрати теплоти на підігрів вентиляційного повітря для m-ого місяця;

Q_{sw} – прихід теплоти від інсоляції для m-ого місяця;

Q_i – прихід теплоти від внутрішніх джерел для m-ого місяця;

η_m – коефіцієнт використання теплоти, що надходить для *m*-ого місяця сезону опалення, розраховується для кожної зони за формулою: $\eta_m = 1 - e^{1/C}$

де $C = \frac{Q_{sw} + Q_i}{Q_z + Q_w + Q_g + Q_a}$ – відношення величини приходу теплоти до втрат.

Результати розрахунку будівлі громадського призначення, конструктивні та теплові характеристики якого містяться в таблиці 2.1, показують, що при термомодернізації, яка передбачає модернізацію системи опалення, ізоляцію плоского даху та заміну вікон, можна зменшити сезонний попит на теплоту на 161 ГДж/рік, що становить 43 % від загального попиту.

Таблиця 2.1 – Характеристики будівлі громадського призначення

Площа будівлі	393,8 м^2	Стіна підвалу	U=0,58 Вт/(м^2·К) U*=0,58 Вт/(м^2·К)
Площа всіх підлог	787,6 м^2	Стіни зовнішні товщиною 40 см	U=0,65 Вт/(м^2·К) U*=0,65Вт/(м^2·К)
Площа внутрішніх підлог	640,1 м^2	Стіна внутрішня товщиною 25 см	U=1,6 Вт/(м^2·К) U*=1,6 Вт/(м^2·К)
Площа обігріву	557,5 м^2	Стеля	U=1,05 Вт/(м^2·К) U*=1,05 Вт/(м^2·К)
Об’єм внутрішніх приміщень	1835,2 м^3	Плоский дах	U=0,39 Вт/(м^2·К) U*=0,19 Вт/(м^2·К)
Об’єм приміщень, які обігріваються	1658,3 м^3	Вікно	U=2,6 Вт/(м^2·К) U*=1,0 Вт/(м^2·К)

Порівняння результатів чисельного моделювання потреб в енергії, яка йде на цілі опалення наведено в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Потреби в енергії для опалення будівлі громадського призначення

Найменування потреб в енергії	До термомодернізації, кВт/(м^2·рік)	Після термомодернізації, кВт/(м^2·рік)	Різниця, %
Сезонна потреба енергії на опалення	183,98	100,46	43,7
Потреба в первинній енергії	450,20	361,6	19,7
Потреба в кінцевій енергії	316,5	235,3	25,7

Витрати енергії на опалення і вентиляцію до термомодернізації становлять:

EP_{T+B}= 55+450,2·0,475+7800/(316,5+0,1·183,98)=291,84 кВт/(м^2·рік)

Витрати енергії на опалення і вентиляцію після термомодернізації:

EP_{H+W}=55+361,6·0,475+7800/(235,3+0,1·100,46)= 258,8 кВт/(м^2·рік).

Узагальнюючі діаграми втрат теплоти на прикладі будівлі громадського призначення, які побудовані за результатами чисельного моделювання в прикладній програмі RETScreen Expert [32], наведені на рисунках 2.2 та 2.3 відповідно до початку технічного оновлення та після завершення термомодернізації.

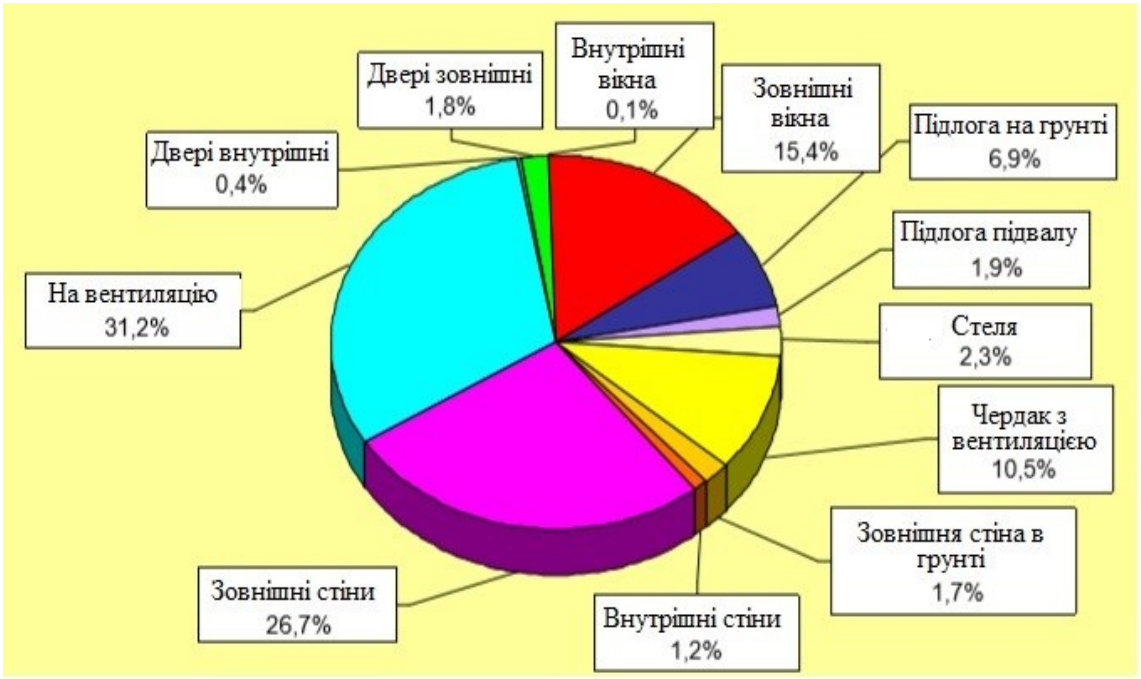

Рисунок 2.2 – Частки теплових втрат окремих елементів будівлі у сукупних втратах протягом опалювальному сезоні (до термомодернізації)

Рисунок 2.3 – Частки теплових втрат окремих елементів будівлі у сукупних втратах протягом опалювальному сезоні (після термомодернізації)

2.4. Аналіз ефективності використання традиційних та теплонасосних систем теплопостачання

В роботі [21] виконано порівняльний термодинамічний аналіз традиційних систем теплопостачання та теплонасосних систем (рисунок 2.4), які забезпечують:

– генерацію електрики і прямий електрообігрів (схема *а*);

– генерацію електрики і виробіток теплоти гострою парою (схема *б*);

– сумісну генерацію електрики та теплоти (схема *в*);

– сумісну генерацію електрики та теплоти (схема *г*);

– теплонасосну генерація електрики і теплоти (схема *д*);

– генерація електрики, що сумісна з ТН теплопостачанням (схема е).

Зіставлені теплових схем, наведених на рисунку 2.3, яке виконано за термоекономічними показниками, дозволяє визначити перевагу одного варіанта над іншим, за умов, коли використовується одне і теж джерело первинної енергії [19–29].

В інших випадках виграш не завжди відповідає виграшу в витратах на різні ПЕР через різну вартість первинної енергії. Тому при зіставлення варіантів важливим є врахування принципів термоекономіки.

Термодинамічні схеми інтегрованого виробництва теплоти і електроенергії доцільно порівнювати по витраті високопотенційної теплоти Q_1, яка розглядається як первинна енергія, що йде на виробництво певної кількості електроенергії W і теплоти середнього потенціалу Q. Відповідно до такої постановки задачі в схемах з роздільним виробітком теплоти і електроенергії, витрати високо потенційної теплоти (ВПТ):

$$Q_1 = Q / \eta_Q + W / \eta_W,$$

де η_Q і η_W – ККД, які відносяться до генерації теплоти і електрики, відповідно.

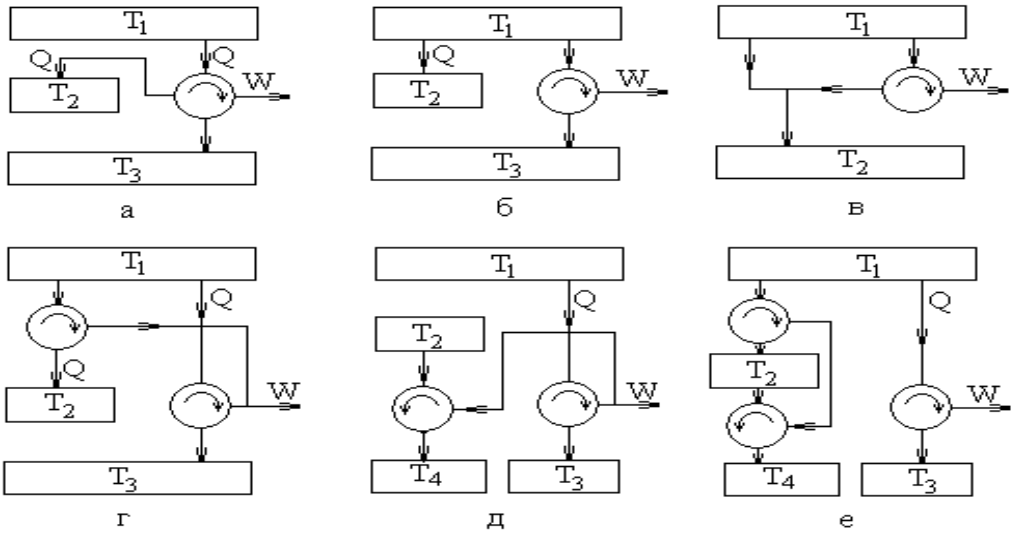

Рисунок 2.5 – Схеми інтегрованого виробництва теплоти і електрики

При зіставлені теплонасосної схеми за схемою, наведеною на рисунку 2.6, *в,* питома економія ВПТ (на 1 кДж згенерованої теплоти) змінюється у межах:

$$\infty > Q/W \geq T_2/(T_1 - T_2).$$

При цьому у діапазоні $Q/W < T_2/(T_1 - T_2)$ вказана схема є малоефективною [19–29].

Для випадку когенераційної схеми (рисунок 2.6, *г*) справедливим є діапазон

$$T_2/(T_1 - T_2) \geq Q/W > \infty.$$

При цьому у діапазоні $Q/W > T_2/(T_1 - T_2)$ вказана схема є малоефективною

А за умови $Q/W = T_2/(T_1 - T_2)$ всі три схеми, які містяться на рисунку 2.6, *в, г, е*, виявляються ефективними [19–29].

Таким чином, термодинамічний підхід до аналізу дозволяє визначити техніко-економічну доцільність того чи іншого можливого варіанту теплонасосної системи енергопостачання.

2.5. Особливості використання вторинних та альтернативних джерел енергії для теплонасосних систем теплопостачання

Як джерело теплової енергії для ТН можуть використовуватись РВДЕ, теплота ґрунтових та природних вод, відпрацьованої води системи ГВ, теплота ґрунту,

скидна теплота промислових і муніципальних об’єктів. На рисунку 2.6 наведені принципові схеми ТН, які використовують низькопотенційну теплоту (НПТ) різних видів [19–29]. Найбільш розповсюдженою є ТНС опалення. На рисунку 2.7 міститься схема ТНС, де джерелом НПТ є вода довкілля. Якщо використовувати скидну теплоту циклу теплових двигунів, то ефективність роботи ТН зростає. Джерелом НПТ може бути ґрунтова енергія [40–43]. Досвід експлуатації ТНС для опалення будинків дозволяє зменшити витрату традиційного палива на 85 %.

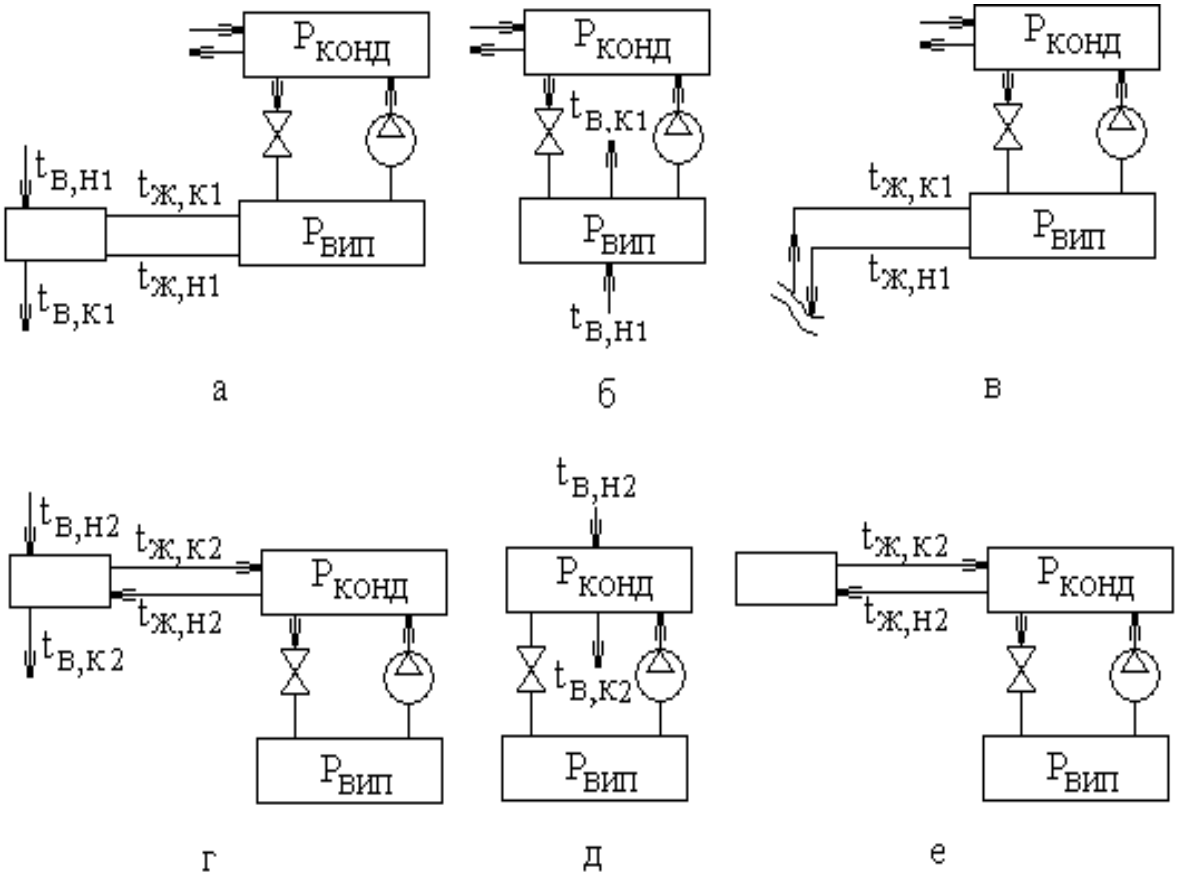

Рисунок 2.6 – Принципові схеми опалення і вентиляції з ТН

а – утилізація теплоти повітря з проміжним контуром циркуляції; б – утилізація теплоти повітря без проміжного контуру циркуляції; в – утилізація теплоти вод; г – схема повітряного опалення з припливною вентиляцією; д – схема повітряного опалення з припливною вентиляцією без проміжного контуру циркуляції; е – схема водяного опалення

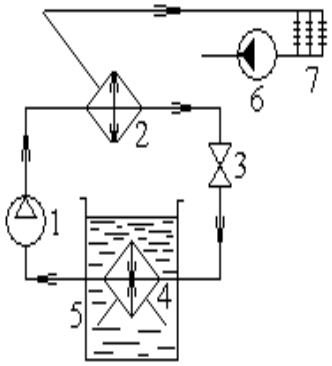

Рисунок 2.7 – ТН схема опалення з використанням води
1 – компресор; 2 – конденсатор; 3 – терморегулюючий вентиль;
4 – випарник; 5 – водойма; 6 – насос контуру опалення;
7 – калориферні установки приміщення

Коли різниця температур джерела теплоти T_1 і T_2 велика, а коефіцієнт перетворення ТН зменшується, для підвищення величини коефіцієнта φ можна використовувати каскадну схему (рисунок 2.8) теплового насоса, де конденсатор 2 нижнього контуру для першого холодильного агенту в верхньому контурі є випарником 4* для другого холодильного агенту.

На рисунку 2.9 наведена схема системи опалення з використанням теплоти ґрунтових вод [37].

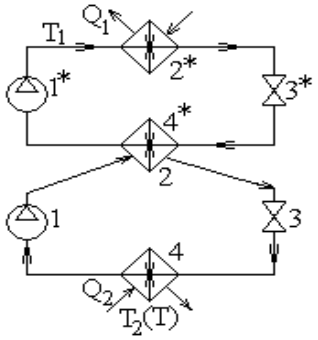

Рисунок 2.8 – Каскадна схема ТНУ:
в нижньому контурі, де циркулює перший холодильний агент: 1– компресор; 2–конденсатор; 3–регулюючий вентиль; 4– випарник;
в верхньому контурі, де циркулює другий холодильний агент: 1*– компресор; 2*– конденсатор; 3*– регулюючий вентиль; 4* – випарник

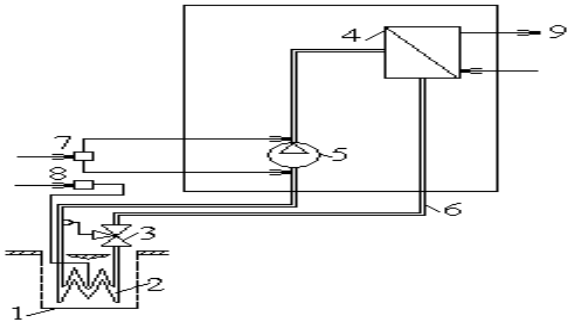

Рисунок 2.9 – Схема використання теплоти зі свердловині
1 – свердловина; 2 – випарник; 3 – детандер; 4 – конденсатор; 5 – компресор; 6 – контур циркуляції; 7 – датчик високого/низького тиску; 8 – датчик температури; 9 – відвід теплоти до ОП

Децентралізовані системи теплопостачання на базі ТН можуть використовувати різнорідні ЗВДЕ (сонце, повітря, тепло ґрунту, стічних вод) та низькопотенційної скидної теплоти [39 – 42]. Використання скидної теплоти для підігріву теплоносія на вході ТН, сприяє росту температури кипіння в випарнику, збільшенню сприйнятого теплового потоку та зростанню теплової потужності ТНУ. ТН установки, що суміщені з традиційною системою опалення, згідно з загальноприйнятою класифікацією, належить розрізняти (рисунок 2.11): низького і середнього температурного рівня з діапазоном температур 45…65 °С (рисунок 2.11, а, б); високотемпературні, для яких характерний змінний режим роботи ТН (рисунок 2.10, в, г, д), де передбачається, що ТНУ буде покривати тільки частку максимального теплового навантаження системи. А у режимах з дефіцитом теплової потужності покриття потреб відбувається виключно за рахунок резервного джерела енергії (РДЕ).

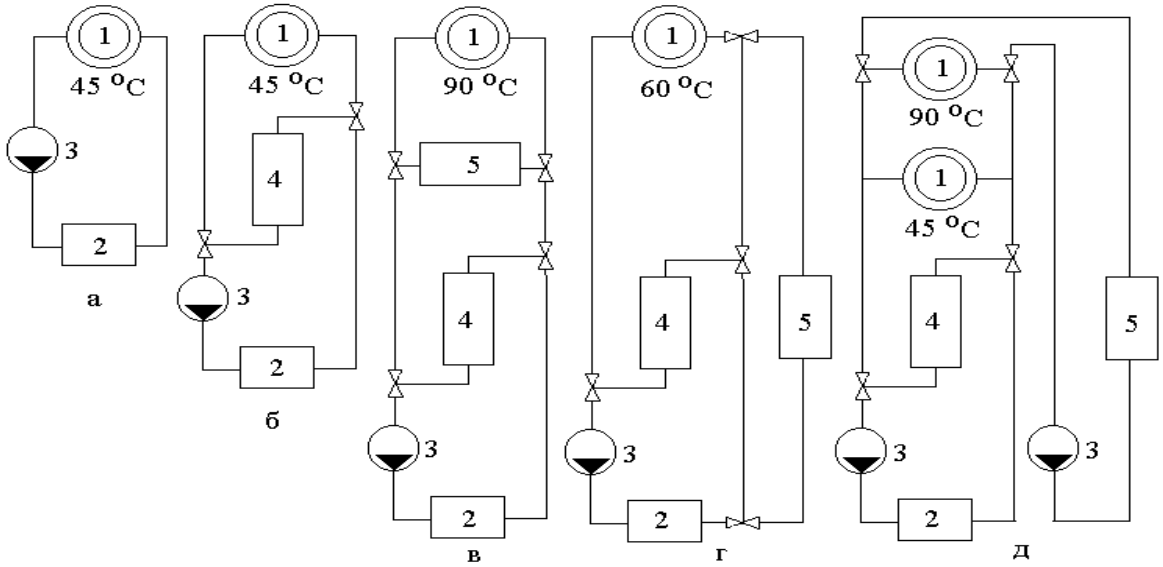

Рисунок 2.10 – Класифікація систем теплопостачання з ТН:
1 – система опалення; 2 – ТН; 3 – насос; 4 – АК; 5 – РДЕ

Робочими режимами ТНУ [43, 44] є: однакові потреба у теплоті і холоді; потреби тільки у теплоті; потреби тільки у холоді; потреби у теплоті та холоді з надлишком холодопродуктивності; потреби у теплоті та холоді з надлишком теплопродуктивності. В усіх випадках параметрами, що регулюються разом чи

окремо, є температура гарячої і холодної води. Регулюючою дією в ТН є витрата гарячої води, холодної води та продуктивність компресора. В ТН з акумулятором управління здійснюється таким чином, щоб забезпечити роботу в безупинному режимі. В системі без акумулятора в режимі з надлишком теплопродуктивності, що характерно для ТНУ малої потужності, передбачається періодична робота ТН.

Аналіз схем ТНУ “повітря-повітря” та ТНУ на базі інших ЗВДЕ показує, що коефіцієнт перетворення первинної енергії в цьому випадку зростає в 2…2,5 рази [43–46]. При знижені температури повітря зменшується потужність ТН типу “повітря-повітря” і зростають теплові втрати, спостерігаються дві зони функціонування установки (рисунок 2.11) [44]. В першій зоні виробляємо потужність $N_{тн}^{вироб}$ повністю компенсує втрати енергії $N^{втрат}$. В другій зоні втрати енергії $N^{втрат}$ перевищують $N_{тн}^{вироб}$ і необхідно використовувати РДЕ.

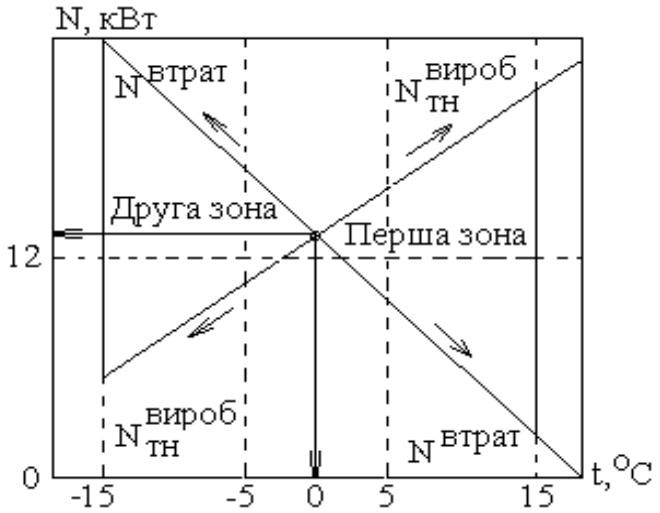

Рисунок 2.11 – Зони доцільності роботи ТН

Як альтернативна енергія для теплонасосних систем теплопостачання може використовуватись енергія стічних вод (рисунок 2.12) [43].

Робоче тіло, що використовується в циклі ТН з низькою температурою випарювання поступає в випарник 2, куди підводиться низькопотенційна теплота стічних вод 1 при температурі на вході 10…18 °С та на виході 2…4 °С) В компресорі 4 досягається підвищення тиску і температури робочого тіла. В конденсаторі 3 мережна вода нагрівається від 50…70 °С до 60…80 °С [42–44].

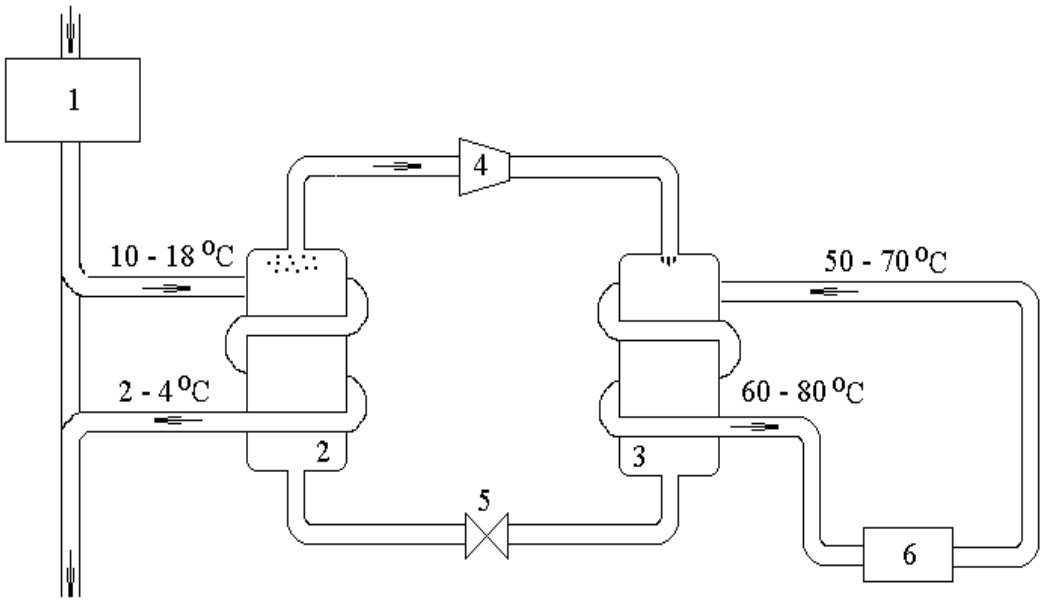

Рисунок 2.12 – Схема теплонасосної установки на стічних водах
1 – джерело очищених стічних вод; 2 – випарник ТН; 3 – конденсатор ТН;
4 – компресор ТН; 5 – дросельний пристрій ТН; 6 – система опалення

Аналогічно схемі використання стічних вод зустрічаються пропозиції щодо використання енергії ґрунту [37, 40, 42 – 51], наприклад, використання енергії ґрунту для тепличного господарства (рисунок 2.13) на основі теплових труб (ТТ) як ґрунтових теплообмінників (ТО) [42]. На глибині 10 м температура ґрунту досить стабільна (10…12 °С), і практично не залежить від коливань температури зовнішнього повітря. ТТ встановлюють вертикально чи горизонтально в ґрунті.

Для довгострокового акумулювання теплоти використовують резервуари з водою чи галькою. Розрахунки з урахуванням теплоємності води (C_p =4,187 кДж/(кг·К) та гальки (C_p =0,837 кДж/(кг·К) показують, що для зберігання 1 ГДж теплоти при температурі 30 °С об'єм води має бути 12 м^3 (11941 кг), а гальки – 26,6 м^3 (59737 кг) – тобто необхідні великі теплоізольовані ємності. Теплиця 1 з прозорим дахом 2, що стоїть на підземному тепловому акумуляторі (ТА) 4, де містяться теплові грунтові трубки (ТГТ) 3, що передають енергію від ТА до ґрунтової поверхні [44 –52]. ТГТ підтримують температуру поверхні ґрунту на рівні 25 °С. Середня температура в підземному ТА 30 °С, навколишнього повітря 5 °С. ТА нагрівається до 28…30 °С від сонячного колектору (СК).

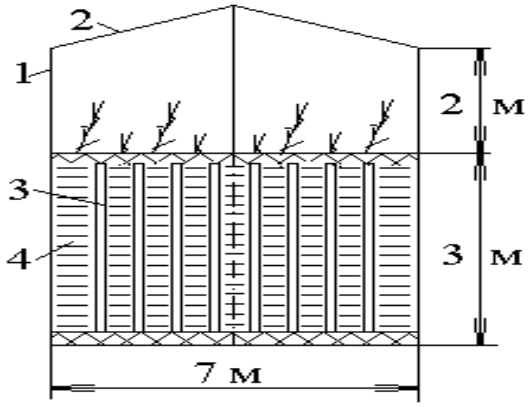

Рисунок 2.13 – Теплиця з ТТ для використання енергії ґрунту

В регіонах України з континентальним кліматом можна накопичувати значну кількість енергії в підземних ТА. При використанні ТНУ ґрунт влітку є джерелом холоду, а взимку – теплоти. В роботах [53, 55] наведено результати натурних випробувань та методика розрахунку для цілей охолодження і підігріву повітря у приміщені.

Ґрунтовий теплообмінник, який призначений для створення мікроклімату у приміщені, є масивом вологого ґрунту, крізь який проходить повітря. Аналіз літературних джерел свідчить, що використання енергії ґрунтової води для ТНУ, потребує урахування термічної релаксації ґрунту [44 –56].

2.6. Шляхи і методи підвищення ефективності децентралізованих теплонасосних систем теплопостачання

Для підвищення ефективності теплонасосних систем необхідно вирішити наступні задачі:

– акумулятор теплоти повинен забезпечити сприйняття та віддачу енергії з максимальною інтенсивністю та має бути недорогим;

– для систем опалення необхідно додержуватись вимог, щоб вода з баку акумулятору безпосередньо не поступала в систему;

– система повинна протягом експлуатації забезпечити належні теплові характеристики, економічність та має відрізнятись простотою монтажу та ремонту.

Вказані задачі можна вважати вирішеними, якщо децентралізована ТНС ефективно працює в змінних кліматичних умовах обраного регіону, що має бути підтверджено математичним моделюванням теплових процесів в елементах системи, режимів її роботи та результатами експериментальних досліджень.

Для підвищення ефективності практичного застосування систем децентралізованого теплопостачання раціональним шляхом є застосування теплонасосних технологій, з використанням різнорідних ЗВДЕ та засобів гібридного акумулювання теплоти, для одержання кумулятивного ефекту від використання як звичайних теплових акумуляторів, так і від накопичення теплоти стінами будівлі з додержання наступних умов:

– цілорічне використання систем з високою ефективністю;

– низькі витрати на одиницю площі ТА при достатній їх ефективності;

– модульність виготовлення системи для споживачів.

Незважаючи на те, що до технологій використання різнорідних ЗВДЕ та вторинних джерел енергії в системах теплопостачання є спільні підходи, необхідно шукати раціональні умови для вкладення коштів, з метою кращого забезпечення вимог споживачів енергії.

2.7. Висновки до розділу

1. Практична реалізація децентралізованих теплонасосних систем з використанням ЗВДЕ та засобів гібридного акумулювання теплоти, для одержання кумулятивного ефекту від застосування не тільки теплових акумуляторів, а також акумулювання теплоти стінами будівлі можна досягти енергозберігаючого ефекту.

2. Використання децентралізованих теплонасосних систем з використанням ЗВДЕ та засобів гібридного акумулювання теплоти, як засобу енергозбереження дозволяє отримати виграш не тільки в енерговитратах, а також зменшує теплове забруднення навколишнього середовища.

3. В відомих публікаціях відсутні схемно-конструктивні пропозиції, децентралізованих теплонасосних систем з використанням ЗВДЕ та засобів гібридного акумулювання теплоти, математичні моделі, зрівняльний аналіз енергетичної ефективності схемних рішень та режимів роботи.

4. Використання теплонасосних систем з використанням ЗВДЕ та засобів гібридного акумулювання теплоти є раціональним шляхом до підвищення ефективності і надійності децентралізованого теплозабезпечення.

5. Сформульовані висновки визначають необхідність дослідження енергетичної ефективності децентралізованих теплонасосних систем з використанням ЗВДЕ та засобів гібридного акумулювання теплоти.

РОЗДІЛ 3
МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ В ЕЛЕМЕНТАХ ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНИХ ГІБРИДНИХ СИСТЕМ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ З СОНЯЧНИМИ КОЛЕКТОРАМИ, ГРУНТОВИМИ ТЕПЛООБМІННИКАМИ І АКУМУЛЯТОРАМИ ТЕПЛОТИ

3.1. Схемно-конструктивні особливості гібридних схем теплопостачання з сонячними колекторами і акумуляторами теплоти

Незважаючи на велику кількість досліджень, спрямованих на розробку і вдосконалення систем теплопостачання з сонячними колекторами (ССТ), середньорічне значення їх коефіцієнта корисної дії залишається невисоким, складаючи в середньому $\eta = 0{,}3…0{,}4$ % [9–11]. При цьому, вартість будівлі з використанням такої установки для цілей гарячого водопостачання зростає на 7… 20 %. Слід зазначити, що вартість згенерованої теплоти виявляється мінімальною саме у сезонних гібридних систем теплопостачання (ГСТ) з тепловими сонячними колекторами і акумуляторами теплоти, які раціонально використовуються як теплообмінники попереднього підігріву води для котелень, а максимальна – у автономних сонячних систем опалення та гарячого водопостачання, незважаючи на їх цілорічну роботу ГСТ, які теж використовуються для попереднього підігріву води для котелень.

Узагальнюючі порівняльні техніко-економічні параметри ГСТ [11, 12], які містяться в таблиці 3.1, свідчать про перспективність використання засобів попереднього підігріву води для котлів, які використовуються в традиційних (ТСТ) і децентралізованих системах теплопостачання (ДСТ).

У гібридних системах теплопостачання з сонячними колекторами і акумуляторами теплоти СК виконують функцію низькотемпературного підігрівача води, яка поступає до котла, а система теплопостачання, високотемпературного теплогенератора, відповідно.

Таке гібридне поєднання функцій дозволяє підтримувати температуру газів після генератора теплоти вище точки роси, щоб не допустити корозії в елементах котла та не допустити зниження ККД сонячного колектора $\eta_{ск}$ при підвищенні температури нагріву води в модулях сонячних колекторів, які є теплообмінниками попереднього підігріву води для котла.

Таблиця 3.1 – Порівняльні техніко-економічні характеристики ДСТ

№	Тип системи	Одиниця вимірювання	Вартість одиниці, тис. дол США	Річне виробництво енергії на одиницю, МВт· ч/год	Вартість виробництва енергії, US$./МВт·год	Кількість палива, що заміщується т.у.п/год.	Строк окупності, років
1	Підігрівач-приставки до котелень	МВт	60 … 70	550	8,5 … 10	90 … 130	6…8
2	Сезонні сонячні установки гарячого водопостачання	$м^3$ /діб	1,5 …3,0	8 … 10	9,5 …12,0	1,5 … 2,5	9…11
3	Автономна водонагрівальна установка	$м^3$/діб	1,5 … 2,5	7,5 … 9,5	9,5 …12,5	1,3 … 2,0	10…12

Економічна доцільність використання децентралізованих гібридних систем теплопостачання з сонячними колекторами і акумуляторами теплоти визначається показником річної економічної ефективності, яка визначається за формулою:

$$Е^{річ} = З_т^{річ} – З_к^{річ} = (К_т \cdot Е_н – С_т^{річ}) – (К_к \cdot Е_н – С_к^{річ}), \qquad (3.1)$$

де $З_т^{річ}$, $З_к^{річ}$ – витрати на виробництво одиниці теплової енергії для ТСТ і ГТС, відповідно;

$К_т$, $К_к$ – капітальні вкладення для ТСТ і ГТС, відповідно;

$Е_н$ – нормативний коефіцієнт амортизаційних відрахувань;

$С_т^{год}$, $С_к^{год}$ — собівартість виробленої теплоти, що визначається вартістю палива і його витратою на одиницю виробленого тепла, а також витратами на експлуатацію системи теплопостачання.

Паливна складова звичайно домінує в витратах на виробництво теплоти в ТСТ і становить понад 3/4 загальних витрат. Капітальні витрати для гібридних систем теплопостачання з сонячними колекторами і акумуляторами теплоти в 3...6 разів перевищують капітальні витрати для ТСТ, що в залежності від призначення визначає конструктивні особливості і температурні режими експлуатації ГСТ.

Таким чином, конструктивна схема гібридна система теплопостачання повинна передбачати, з одного боку, максимальне значення коефіцієнта заміщення:

$$\varphi = Q_c/Q_к ,$$

де Q_c – теплове навантаження сонячного підігрівача-приставки до котла,;

$Q_к$ – теплове навантаження всієї ГСТ.

З іншого боку, для зниження паливної складової загальних витрат має бути прийнятна величина ККД сонячного підігрівача-приставки до котла, щоб досягти економію капітальних витрат на цьому підігрівачі-приставці до котла, яке для ГСТ стає визначальним фактором.

Отже, теплова і відповідно економічна ефективність ГСТ залежить в першу чергу від конструктивних (схемно-конструктивних особливостей системи) та режимних факторів (температури нагріву води в сонячному підігрівачі-приставці).

Для забезпечення ефективної взаємодії сонячного підігрівача-приставки до котла нами пропонується наступна конструктивна схема ГСТ (рисунок 3.1).

У гібридній системі БА, який є накопичувачем теплоти поділяється

екраном на циліндричну на внутрішню і зовнішню коаксіальні порожнини, які розташовані на однаковій відстані між собою.

У внутрішній коаксіальній порожнині розташовані такі теплообмінні пристрої:

– теплообмінник для підведення теплоти від сонячного колектора для попереднього підігріву води для котла, який міститься в нижній зоні БА;

– теплообмінник підведення теплоти від котельні, який в опалювальний сезон міститься після опалювальних приладів (ОП), у верхній частині БА.

У зовнішній коаксіальній порожнини БА у верхній його частині розташований теплообмінник відведення теплоти для нагріву води для цілей ГВП.

Таке розташування теплообмінників а акумуляторі теплоти дозволяє забезпечити циркуляцію рідини природним шляхом, яка відбувається у напрямку вгору у внутрішній коаксіальній порожнині БА та у напрямку вниз у зовнішній коаксіальній порожнині, забезпечуючи зменшення втрат теплоти за рахунок спрямування охолоджуючого потоку робочого тіла вздовж зовнішньої поверхні теплообміну БА.

Сонячні колектори ГСТ підключені послідовно і розміщуються в двох рядах паралельно. При цьому нижній ряд СК1 – низькотемпературний набирається з більш дешевих модулів сонячних колекторів, забезпечених полегшеної теплоізоляцією з одним прозорим покриттям, а верхній ряд СК2 – високотемпературний складається з більш дорогих екранованих модулів сонячних колекторів, які забезпечені проміжним екраном, з потовщеною теплоізоляцією і двома шарами прозорого покриття. Енергетичні переваги СК 2 з проміжним екраном для ГСТ [52] в порівнянні зі звичайними СК без екрану розглянуті в Додатку Б.

Треба зазначити, що площа поверхні теплообміну окремо для кожного з трьох теплообмінників теплового акумулятора приблизно в 2 рази менше поверхні теплообміну пучка труб сонячних колекторів, але сумарно для всіх теплообмінників БА може виявитись більше.

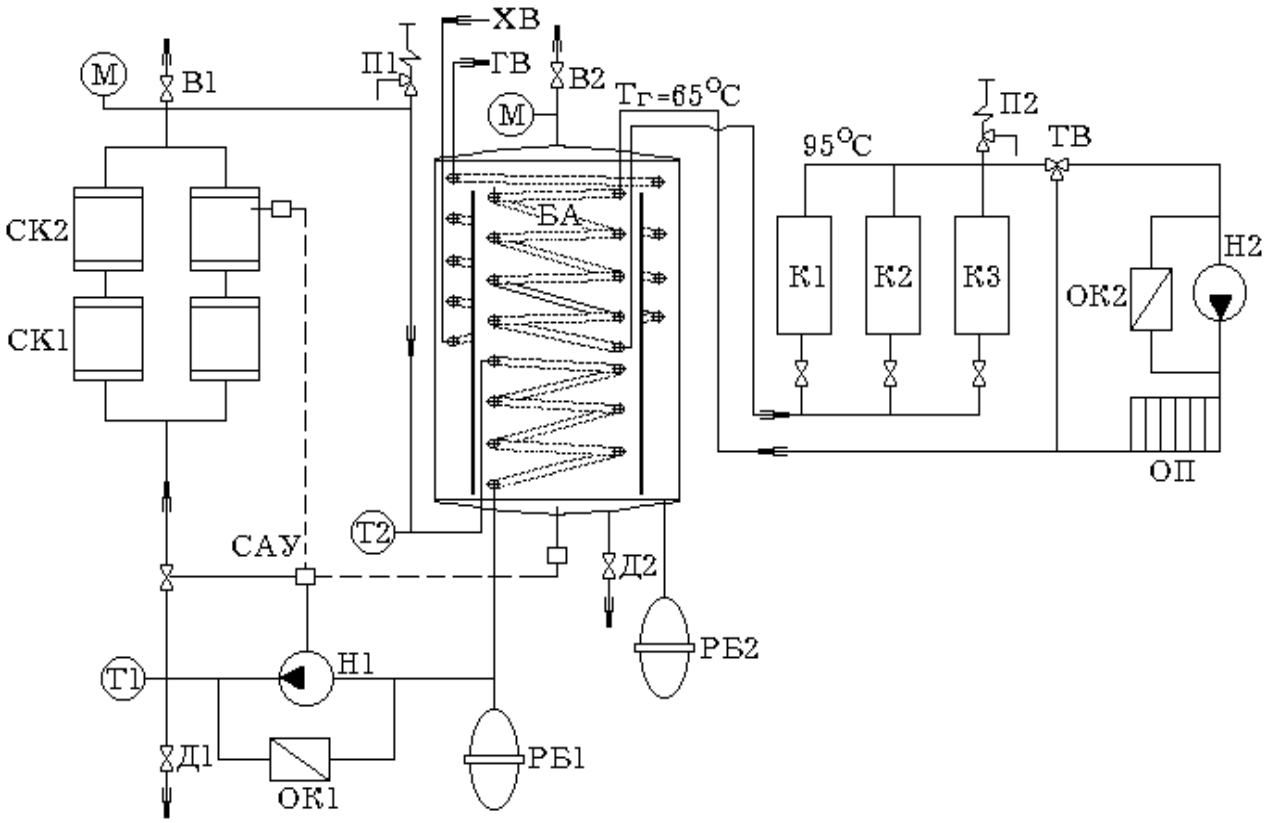

Рисунок 3.1 – Схема гібридної системи теплопостачання з теплообмінниками для нагріву рідини у внутрішній коаксіальній ємності бака-акумулятора

Для зниження капітальних витрат в ГСТ доцільно розглянути другий варіант конструктивної та теплової схеми такої системи (рисунок 3.2). Відмінність другого варіанту схеми від першого полягає в тому, що замість теплообмінників для нагріву рідини у внутрішній порожнині БА розміщуються колектори для вводу нагрітої води від СК і від котельні.

При цьому внутрішня порожнина поділяється перфорованою діафрагмою приблизно на дві однакові за об’ємом секції для збереження стратифікації по висоті теплового акумулятора, для того, щоб зменшити теплообмін між верхньою

високотемпературною секцією та нижньою – низькотемпературною секцією бака-акумулятора.

З урахуванням цього колектори розміщуються у верхній частині секцій, а забірники для виведення високотемпературної води – у верхній частині верхньої секції, а низькотемпературної води – у нижній частині нижньої секції.

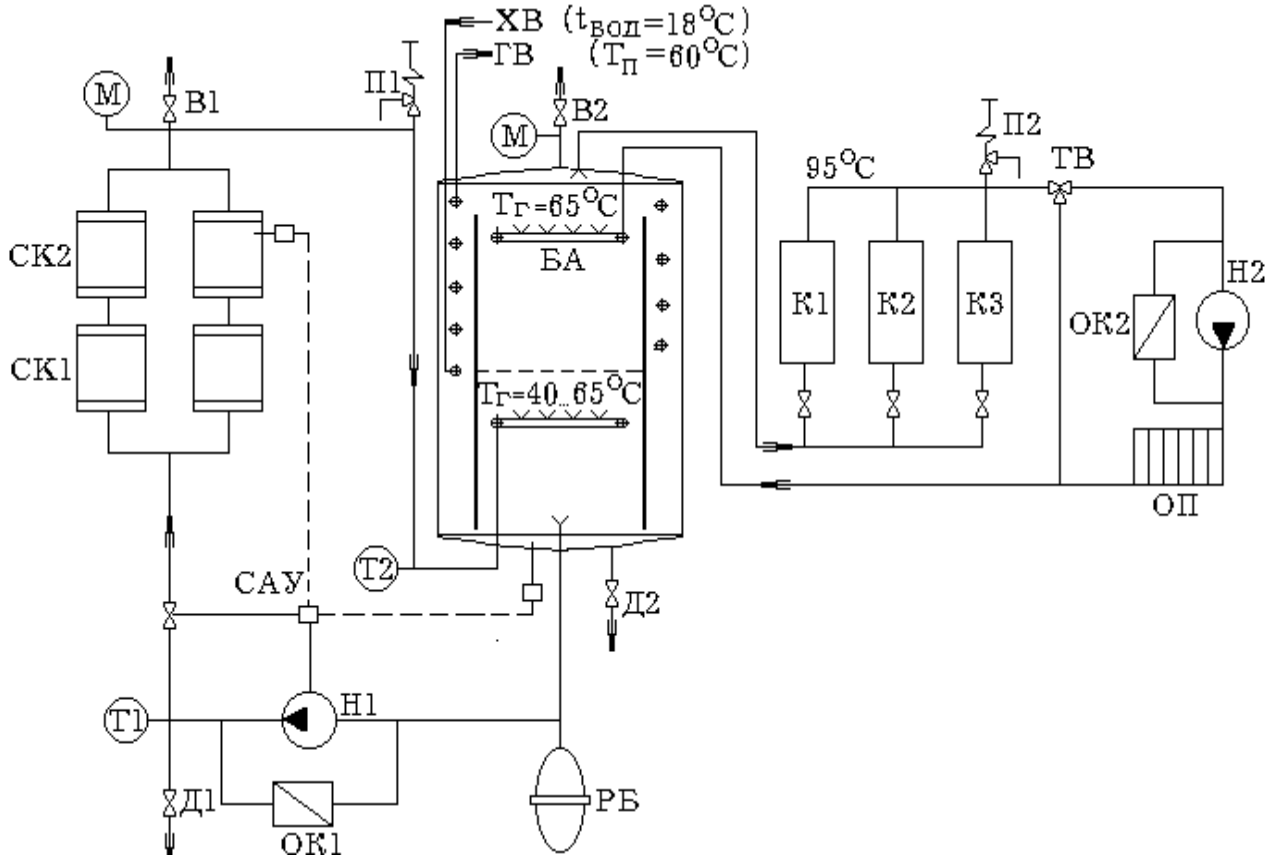

Рисунок 3.2 – Схема гібридної системи теплопостачання з гідравлічними колекторами для підводу нагрітої води від СК і від котлів у внутрішній ємності БА

Беручи до уваги, що частка витрат на капітальні витрати гібридної системи може досягти 50 % і навіть більше від сумарних витрат на виробництво теплоти, другий варіант схеми ГСТ є економічно більш вигідним, бо сумарні витрати знижуються при цьому приблизно на 15...20 % (Додаток Г, рисунки Г.2 та Г.3).

Проте, недоліком другого варіанту схеми (рисунок 3.2) є необхідність використання в обох контурах циркуляції одного теплоносія.

Використання води в сонячному контурі призводить до необхідності зливати її з СК при зниженні температури навколишнього середовища нижче 0°С, а також передбачати захист

від корозії внутрішньої поверхні трубок СК шляхом попереднього вакуумування (деаерації) води, що заповнює контур циркуляції системи.

3.2. Економічна ефективність гібридних систем теплопостачання з сонячними колекторами і акумуляторами теплоти

Розглянемо основні розрахункові співвідношення для визначення економічної ефективності теплопродуктивності гібридної системи теплопостачання з сонячними колекторами і акумуляторами теплоти.

Теплопродуктивність котла:

$$Q_T = B_{УП} \cdot Q_H \cdot \eta_T \ , \qquad (3.2)$$

де $B_{УП}$– витрата умовного палива, кг;

Q_H =29,33 МДж/кг – нижча теплота згоряння умовного палива;

η_T – ККД котла.

Теплопродуктивність СК:

$$Q_{СК} = A_{СК} \cdot F_R \cdot \{(\alpha \cdot \tau) \cdot H_C - K \cdot [0{,}5 \cdot (T_2 + T_1) - T_a]\} \ , \qquad (3.3)$$

де $A_{СК}$ – площа абсорбера СК, м^2;

F_R – коефіцієнт відводу тепла;

α – коефіцієнт поглинання інсоляції абсорбером СК;

τ – коефіцієнт пропускання інсоляції прозорим покриттям абсорбера СК;

H_C – густина потоку інсоляції на поверхні абсорбера, Вт/м^2;

T_1, T_2 – температура рідини на вході та виході СК, відповідно, К.

К – сумарний коефіцієнт втрат тепла від СК в навколишнє середовище;

T_a – температура навколишнього повітря, К.

Оскільки ККД СК дорівнює відношенню теплопродуктивності СК до кількості сонячної енергії, що надходить на його поверхню, то

$$\eta_{СК} = Q_{СК} /(A_{СК} \cdot H_C), \qquad (3.4)$$

з урахуванням рівняння (3.3)

$$\eta_{СК} = F_R \cdot \{(\alpha \cdot \tau) - (K/H_C) \cdot [0{,}5 \cdot (T_2 + T_1) - T_a]\}. \quad (3.5)$$

Позначимо:

$$y = [0{,}5 \cdot (T_2 + T_1) - T_a]/ H_C \ , \quad (3.6)$$

тоді одержимо $$\eta_{СК} = F_R \cdot [(\alpha \cdot \tau) - K \cdot y. \quad (3.7)$$

Для визначення річної економічної ефективності використання традиційної установки, яка містить водогрійний котел і сонячний контур (СК з ТА), використаємо співвідношення (3.1), в якому:

– річні витрати на виробництво теплоти традиційної енергоустановкою:

$$З_т^{річ} = к_т \cdot E_н + c_{у.п.} \cdot B_{у.п} \cdot h^{річ}/\eta_т + c_т^e, \quad (3.8)$$

– річні витрати на виробництво теплоти гібридною установкою з екранованими СК, які використовуються для і тепловими акумуляторами:

$$З_к^{річ} = к_к \cdot E_н + c_{у.п.} \cdot B_{у.п} \cdot h^{річ}(1 - \varphi)/\eta_т + c_т^e, \quad (3.9)$$

де $\varphi = Q_{ск}^{річ}/Q_к^{річ}$ – коефіцієнт заміщення (частка теплового навантаження, що покривається за рахунок утилізації інсоляції);

$h^{річ}$ – число годин роботи гібридною установкою з екранованими СК і тепловими акумуляторами протягом року;

$B_{у.п}$ –витрата умовного палива годинна за годину;

$c_{у.п}$ – вартість умовного палива;

$c_{.т}^e$, $c_{.к}^e$ – вартість експлуатації традиційної та гібридної установки з екранованими СК і тепловими акумуляторами, відповідно;

$к_т$, $к_с$ – капітальні внески для традиційної і гібридної установки з екранованими СК і тепловими акумуляторами, відповідно;

$к_к = к_т + к_с$ – капітальні витрати для гібридної установки з екранованими СК і тепловими акумуляторами.

Використання гібридної установки з екранованими СК і тепловими акумуляторами економічно можна вважати доцільним за умови:

$$E^{річ} = З_т^{річ} - З_к^{річ} > 0. \quad (3.10)$$

При цьому розглядаються такі показники як:

– питома вартість виробленої теплоти:

$$З_к^{річ*} = З_к^{річ} / Q_п^{річ}, \quad (3.11)$$

де $Q_п^{річ}$ – річна теплопродуктивність комбінованої установки;

– термін окупності системи екранованих СК з тепловими акумуляторами, які використовуються як теплообмінники попереднього підігріву води для автономного котла децентралізованої системи теплозабезпечення:

$$h_{ок} = к_с / E^{річ}. \quad (3.12)$$

У таблиці 3.2 наведено методику і результати розрахунків економічної ефективності використання децентралізованої гібридної установки з виробництва теплоти для України. При цьому, представницьким пунктом розрахунку визначено південний регіон України, а саме, місто Одесу.

Вхідні дані ГСТ, які використані для розрахунків (таблиця 3.2):

Теплова потужність котла ДКВР-10:

$$Q_п^{річ} = 8{,}2 \cdot 10^3 \text{ кВт} = 29{,}5 \text{ МДж/год} = 255 \cdot 10^3 \text{ ГДж/рік}.$$

Витрата умовного палива котлом:

$B_{у.п.} = 0{,}98$ т/год;

ККД котла

$\eta_к = 0{,}8$;

Вартість котла $К_т = 2 \cdot 10^6$ US$;

Вартість т у.п.: 70 US$ /т у.п.;

$E_н = 0{,}1$.

У розрахунках прийнято, що система працює цілорічно, забезпечуючи споживача гарячою водою з температурою $T_г = 60$ °С, а СК з акумулятором є теплообмінником попереднього підігріву води для котла децентралізованої системи теплозабезпечення, який працює протягом півроку літнього сезону.

Коефіцієнт заміщення:

$$\varphi = T_2 - T_1 / [2 \cdot (T_г - T_1)] . \quad (3.13)$$

Використовуючи середнє значення добової сонячної радіації $Q^{ср}$, вираженої в МДж/(м^2·діб), визначається середня густина потоку сонячного випромінювання протягом півроку літнього сонцестояння :

$$H^{ср} = Q^{ср}/(3{,}6 \cdot 24), \text{ Вт/м}^2. \quad (3.14)$$

або $H^{ср} = Q^{ср}/(3,6\cdot24)= 22,37/(3,6\cdot24)= 259$ Вт/м^2

Таблиця 3.2 – Результати розрахунку техніко-економічної ефективності гібридної системи з сонячними колекторами і акумуляторами теплоти

Температура нагріву води, ^{0}C		40	45	50	55	60	65
Розрахунковий параметр ГСТ	Формула						
φ	(3.13)	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
у	(3.6)	0,027	0,0308	0,0347	0,0385	0,0423	0,0461
$\eta_{СК}$	(3.7)	0,514	0,492	0,471	0,450	0,428	0,407
$А_{СК}$, м^2	(3.16)	0	5245,9	11174,7	17554,9	24568,7	32315,2
$к_с$, млн. US$	$к_с^*\cdot А_{СК}$	0	0,535	1,117	1,755	2,457	3,232
$С_к^{рач}=c_{у.п.}\cdot В_{у.п}\cdot h^{річ}(1-\varphi)/\eta_т$, млн. US$	(3.9)	1,06	0,954	0,848	0,742	0,636	0,53
$к_к = к_т + к_с$, млн. US$	(3.9)	2	2,535	3,117	3,755	4,457	5,232
$З_к^{річ}$, млн. US$	(3.9)	1,259	1,207	1,159	1,117	1,082	1,053
$Е^{річ}$, млн. US$ /год	(3.10)	0	0,0525	0,1002	0,1423	0,1782	0,2067
$h_{ок}$, років	(3.12)	0	10,18	11,15	12,33	13,79	15,64
$З_к^{год*}$, US$/ГДж	(3.11)	4,94	4,73	4,55	4,38	4,24	4,13

З урахуванням тривалості сонячного сяйва $h_с$= 1709 год протягом півроку літнього сонцестояння визначається середня густина потоку інсоляції:

$$H_с^{ср} = H^{ср}\cdot(h_{год}/2)/h_с\ , Вт/м^2. \qquad (3.15)$$

де $h_{год}$ = 8650 годин – тривалість роботи ГСТ;

В результаті одержуємо:

$$H_с^{ср} = H^{ср}\cdot(8650/2)/1709 = 259\cdot8650/(2\cdot1709)= 655,35\ Вт/м^2$$

У розрахунках використано багаторічні метеорологічні дані щодо зміним середньої температури зовнішнього повітря $Т_а^{ср}$ протягом року, що впливає на ККД сонячного колектора, для піврічного періоду літнього сонцестояння з поправкою на тривалість сонячного сяйва, визначені за програмою на алгоритмічній мові

Turbo Pascal (Додаток В). Основні параметри СК, а саме, F_R, τ, α, К, прийняті з урахуванням конструкції СК з одинарним склінням при витраті води m = 0,02 кг/с крізь одиничний модуль СК площею $A_{СК} = 1$ м^2.

Річна кількість генерованої теплоти, становить:

$$Q^{ср}=4{,}0 \text{ ГДж/(м}^2\cdot\text{год)}=4{,}0\cdot 0{,}492/0{,}416=4{,}73 \text{ ГДж/(м}^2\cdot\text{год)}.$$

Загальна площа модулів СК $A_{СК}$ з акумуляторами теплоти визначається теплопродуктивністю гібридної системи теплопостачання $Q_п^{річ}$, коефіцієнтом заміщення φ і кількістю теплоти $Q_{СК}^{ср}$ протягом року з урахуванням регіональних кліматичних умов:

$$A_{СК} = \eta_{СК}^{45}\cdot \varphi^{i} \cdot Q_п^{річ} / (\eta_{СК}^{i} \cdot Q_{СК}^{ср}) , \qquad (3.16)$$

де $\eta_{СК}^{45}$, $\eta_{СК}^{i}$ – ККД СК при температурі нагріву води $T_2 = 45\ ^0$С та поточний ККД при зміні режиму роботи ГСТ, визначений за формулою (3.5), відповідно;

φ^{i} – поточний коефіцієнт заміщення при різних T_2^{i} , який визначається за формулою (3.13), наведений в таблиці 3.2.

Параметри ТСТ щодо її теплопродуктивності і вартості; витрати і ціни палива, ККД, коефіцієнта амортизаційних витрат коштів, наведено в додаткових даних до таблиці 3.2.

Результати розрахунку вартості виробленої теплоти і річної економічної ефективності гібридної системи децентралізованого теплопостачання з сонячними колекторами і акумуляторами теплоти для кліматичних умов регіонів України наведено в графічному виконанні на рисунках 3.3 та 3.4. При цьому, розглянуто використання СК теплообмінників попереднього підігріву води для котла при різній питомій вартості СК $к_с$ = 50, 75, 100 US$/м^2, включаючи поверхню теплообміну БА, а також розраховано зміну коефіцієнта заміщення φ в функції зміни температури T_2 в БА. Аналіз графіків (рисунки 3.3 та 3.4), дозволяє зробити висновок про те, що питома вартість сонячного колектора суттєво впливає на вартість теплоти, яка генерується ГСТ децентралізованого теплозабезпечення з СК і ТА, $З_к^{річ*}$ і економічну ефективність $Е^{год}$.

При цьому, оптимальне значення коефіцієнта заміщення φ зміщується в бік збільшення температури підігріву води T_2 при зниженні капітальних витрат на СК,

які використовуються для попереднього підігріву води для котла $к_с$, і це зміщення тим більше, чим вище густина потоку сонячного випромінювання H_C.

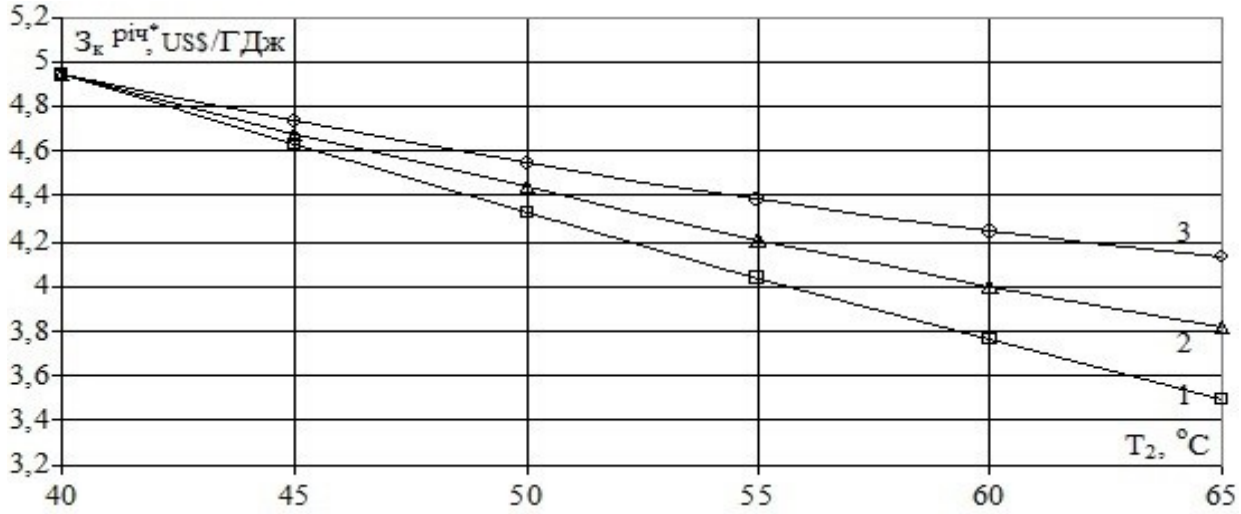

Рисунок 3.3 – Вартість теплоти, виробленої ГСТ в залежності від температури нагріву води і питомої вартості СК і теплового акумулятора:
1 – $\bar{к}_с$ =50 *$*/м^2; 2 – $\bar{к}_с$ =75 $/м^2; 3 – $\bar{к}_с$ =100 $/м^2

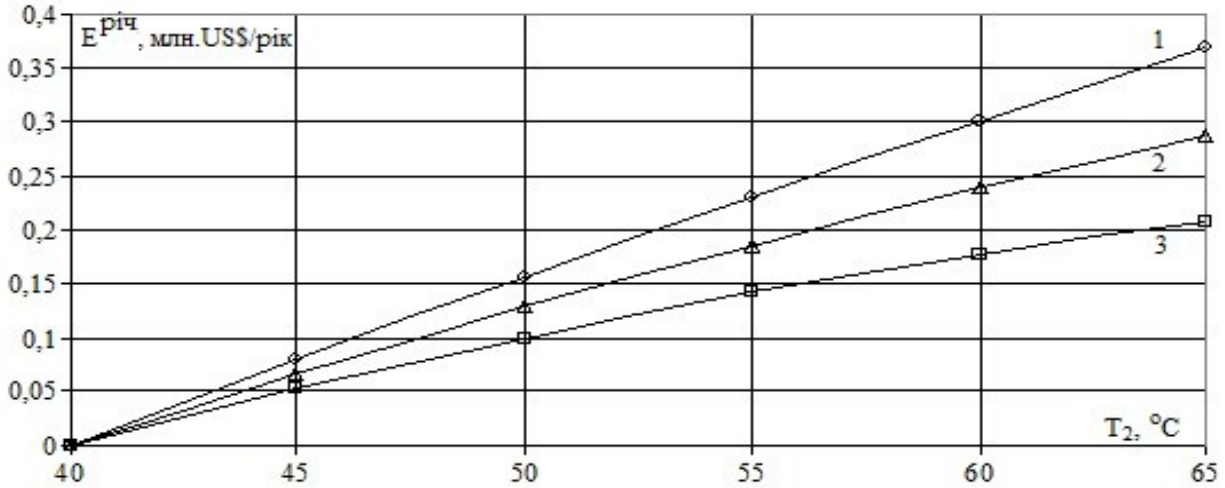

Рисунок 3.4 – Річний економічний ефект від використання ГСТ тепловою потужністю генератора теплоти $Q_п^{год} = 255 \cdot 10^3$ ГДж/рік в функції зміни температури підігріву води для котла і питомої вартості СК і ТА:
1 – $к_с$ =50 *$*/м^2; 2 – $\bar{к}_с$ =75 $/м^2; 3 – $к_с$ =100 $/м^2

Аналіз результатів розрахунку економічної та екологічної ефективності за методикою Міністерства природних ресурсів Канади RETScreen [32], показує, що для кліматичних умов регіону експлуатації м. Одесса (Додаток Г, рисунок Г.1) загальні витрати на реалізацію проєкту гібридної системи теплопостачання з

сонячними колекторами-приставками і акумуляторами теплоти при вартості сонячних колекторів площею 4 м^2, яка дорівнює 483 US$, а також накопичувача теплоти (БА), насосів, труб, арматури, монтажних робіт, транспортних і інших витрат) для електричного котла тепловою потужністю до 5 кВт складають 1838 US$, а термін окупності системи дорівнює 5 років, якщо використовувати СК з проміжним гофрованим екраном (Додаток Г, рисунок Г-2 [52, 53]). За місяць літнього сезону теплова продуктивність СК теплообмінників для попереднього підігріву води для котла площею $A_{СК}$ = 4 м^2 дорівнює 1,58 МВт·год (5,68 ГДж), середньодобова теплова потужність в літні місяці – 2,2 кВт, за півріччя літнього сонцестояння – 1,3 кВт. З урахуванням коефіцієнта емісії діоксиду вуглецю t_{CO2} = 0,196 т/МВт·рік, отримуємо річне зниження викидів діоксиду вуглецю при використанні сонячної приставки до котла – 0,31 т/рік.

3.3. Аналіз ефективності теплонасосних генераторів теплоти на базі різнорідних ЗВДЕ і накопичувачів теплоти, з урахуванням режимів роботи системи

Завданням підвищення енергоефективності є впровадження інноваційних енерготехнологій з мінімальними втратами енергії в довкілля. Використання теплонасосних установок з накопичувачами теплоти, завдяки раціональному використанню досяжного технічного потенціалу РВДЕ. Існуючі рішення щодо раціонального використання теплонасосної системи з накопичувачем теплоти для децентралізованого теплозабезпечення будівель громадського призначення потребує урахування режимів роботи ТН на базі змінних РВДЕ та обов’язковим акумулюванням теплоти. При цьому, особливості впливу схемно-конструктивних рішень вказаної системи на величину коефіцієнта заміщення не з’ясовані [54–60]. Засоби використання надлишку енергії в акумуляторах теплоти та порівняння технологій різних схемно-конструктивних рішень ТНУ наведено в Додатку Д.

Результати досліджень, які містяться в дисертації, відрізняються високої ефективністю схемно-конструктивних рішень, режимів функціонування теплових насосів з використанням різнорідних ЗВДЕ та гібридних засобів акумулювання теплоти для різних режимів роботи децентралізованих систем теплопостачання. При такому підході забезпечується режим роботи системи, як перманентний (житлові будинки), так і переривчастий (будівлі громадського призначення) зі високим коефіцієнтом заміщення теплопродуктивності альтернативного генератора теплоти, що призводить до корисного ефекту зменшення рівня витрати викопних видів ПЕР в структурі енергетичного балансу країни, Це дозволяє досягти як енергозберігаючого та позитивного еколого-економічного зиску [53].

Для удосконалення режимів роботи і визначення раціональних показників функціонування ТН на базі РВДІ з тепловими акумуляторами (ТА) необхідно використовувати математичне моделювання для з'ясування дієвості впливу об'єму ТА на рівень енергоефективності ТНУ, з урахуванням технічного потенціалу різнорідних змінних ВДЕ, теплового навантаження системи теплопостачання та її інерційності при зміні кліматичних факторів. Це є особливо важливим для приміщень громадського призначення, яким притаманний змінний режимом забезпечення теплотою споживачів протягом доби, що створює гарні перспективи практичної реалізації інструментарію енергозбереження [62,63].

3.4. Аналіз чинників впливу на ефективність функціонування теплонасосних установок з акумулюванням теплоти для автономного теплозабезпечення будівель громадського призначення

Нами виконано аналіз ефективності роботи автономних систем теплозабезпечення споживачів споруд, які відносяться до категорії будівель громадського призначення, який ґрунтується на результатах чисельного моделюванні ДСТ, що функціонує в переривчастому режимі роботи. Генератором теплоти ДСТ є ТН з баком-акумулятором теплоти (ТА), для визначення відповідності умов теплового комфорту в приміщеннях будівлі та збільшенню

строку служби ТНУ при обмеженні кількості циклів увімкнення та вимкнення генератора теплоти, відповідно.

Аналіз функціонування ДСТ з ТН, ТА акумулятором теплоти (ТА) виконано експериментальним шляхом протягом опалювального сезону 2023 –2024 для кліматичних умов міста Одеси. Графіки спожитої теплоти $Q_н$ і середньомісячної температури довкілля $T_{a,av}$, наведені в Додатку, рисунок Г.4.

На основі одержаних експериментальних даних: середньомісячної температури теплоносія на вході, зворотної його температура, температури довкілля і спожитої тепловим насосом електрики, можна визначити впливові чинника на енергоефективність та споживання енергії у робочому та черговому режимі функціонування ДСТ [40 – 44, 50, 53]. На ефективність періодичного режиму опалення найбільший вплив має наявність джерел енергії для форсування режиму натопу, а також інерційність системи та рівень термомодернізації приміщень.

Наявність ТА, що створює можливість для акумулювання теплоти, підвищує енергоефективність системи завдяки більш плавному режиму роботи ТНУ.

У роботах [10–12, 15, 63–64] містяться рекомендації для функціонування ДСТ в перманентному режимі теплозабезпечення щодо співвідношення об’єму БА і потужності ТН, яка становить ~ 70 л на 1 кВт.

Але для переривчастого режиму роботи ДСТ з використанням ТН і ТА рекомендації відсутні, що має бути встановлено з використанням на основі чисельного моделювання з урахуванням потреб споживачів в теплоті, інерційності системи теплозабезпечення та регіональних кліматичних чинників.

3.5. Інструментарій моделювання функціонування ДСТ з використанням ТН і ТА для переривчастого режиму теплозабезпечення з урахуванням кліматичних умов

Незважаючи на те, що використання теплонасосних технологій генерації теплоти для децентралізованих систем теплопостачання є засобом підвищення енергоефективності, його можливо реалізувати лише за умови правильної

експлуатації системи, наприклад, шляхом попередження надмірного підвищення температури, часткових навантажень та надмірно частих циклів вмикання-вимкнення альтернативного генератора теплоти.

Таким чином, окрім традиційного COP – коефіцієнта трансформації, існують додаткові впливові чинники для визначення раціональних режимів роботи ТНУ:

– COP_{NOM} номінальна теплопродуктивність при повному навантаженні, яка визначається на рівні виробництва ТН при опорних значеннях температур, які відповідають технічним нормам. Наприклад, для зовнішнього повітря, наприклад, для ТН типу повітря-вода – опорна температура дорівнює 7 ◦C, а опорна температура подачі води становить 35 ◦C [65–66];

– COP_{FL} характеристика повного навантаження, яка надається фірмою-виробником теплового насоса і відповідає певним зовнішнім температурам і температурам подачі теплоносія, передбачених технічними стандартами. Індекс *FL* означає, що COP визначено при максимальній швидкості компресора та при повному навантаженні [67–71];

– COP_{HP} робоча продуктивність, але при частковому навантаженні, яка визначається шляхом чисельного моделювання. Індекс *HP* ураховує зовнішню температуру, температуру подачі та вплив потужності;

– COP_S загальна продуктивність системи ТН, визначається шляхом чисельного моделювання, з урахуванням співвідношення між теплотою, яка генерується та споживанням електрики тепловим насосом. Ця величина враховує крім теплопродуктивності генератора теплоти також і кумулятивні втрати теплоти в елементах системи, ефективність функціонування якої є важливою характеристикою.

Особливість інструментарію моделювання міститься у визначені ексергетичної ефективності теплового насоса на основі ексергетичного ККД , тобто ексергетичної ефективності режимів його роботи, з урахуванням реальних температур:

$$\eta_{FL}^{Ex} = COP_{FL} \frac{T_{out,HP,FL} - T_{a,in,HP,FL}}{T_{out,HP,FL} + 273}, \quad (3.17)$$

де: η_{FL}^{Ex} – ексергетична ефективність ТН, яка встановлена експериментальним шляхом за умов повного навантаження, з урахуванням впливу коефіцієнта COP_{FL} при розрахунковій теплопродуктивності і відповідних температурах на виході і вході ТН $T_{out,HP,FL}$ та $T_{a,in,HP,FL}$.

Вказані параметри характеризують миттєву теплову або електричну потужність, які притаманні тепловому насосу або ТН системі в цілому. Отже, необхідно визначити інтегральні середні значення цих величин протягом місяця, року, а найчастіше протягом сезонного періоду роботи системи.

Узагальненими показниками протягом часу τ при довготривалій експлуатації є такі параметри:

– сезонний COP_{HP}, який виявляє співвідношення теплопродуктивності і спожитої електрики тільки тепловим насосом протягом часу $\boldsymbol{\tau}$ функціонування *ТН*:

$$COP_{HP} = \frac{\int_{\tau} Q'_{HP} d\tau}{\int_{\tau} N'_{HEAT,in} d\tau} = \frac{\int_{\tau} m'_{HP} c_f (T_{HP,out} - T_{HP,in}) d\tau}{\int_{\tau} N'_{HEAT,in} d\tau} = \frac{Q_{HP}}{W_{HP,in}}, \quad (3.18)$$

– сезонний коефіцієнт трансформації, що визначає співвідношення між теплопродуктивністю та споживанням електричної енергії всієї ТНУ COP_S за проміжок часу $\boldsymbol{\tau}$, який розглядається:

$$COP_S = \frac{\int_{\tau} Q'_{HEAT} d\tau}{\int_{\tau} N'_{HEAT,in} d\tau} = \frac{Q_{HEAT}}{N_{HP,in}} . \quad (3.19)$$

Слід зауважити, що треба враховувати також це коефіцієнт потужності R_C , який є параметром, що пов'язує реальний режим роботи ТН і системи в цілому. Його можна визначити за величною наявної теплоти Q_{HP} і її максимально можливої величини при номінальній потужності за умови повного навантаження при температурі зовнішнього повітря та температурі на вході ТН протягом певного часу τ, з урахуванням тривалості періодів вимкнення ТН:

$$R_C = \frac{Q_{HP}}{\int_\tau Q'_{FL}(T_{out,HP};T_{a,in,HP})d\tau} \quad . \tag{3.20}$$

Тоді COP_{HP} і спожита енергія $N_{HP,in}$ становлять:

$$COP\left(T_{out,HP};T_{a,in,HP};R_C\right) = \frac{T_{out,HP}+273}{T_{out,HP}-T_{a,in,HP}} \cdot \eta_{FL}^{Ex} \cdot \mathrm{f_{R_C}} \tag{3.21}$$

$$N_{\mathrm{TH},in} = \frac{Q_{HP}}{COP(T_{out,HP};T_{a,in,HP};R_C)} \tag{3.22}$$

Коефіцієнт трансформації *COP,* який визначається за співвідношенням (3.21) може бути погодинним, добовим, середньомісячним та сезонним, що залежить виключно від τ – тривалості функціонування ТН [72–74].

3.6. Моделювання теплових процесів на основі енергобалансу функціонування ДСТ з тепловим насосом та кумулятивним ефектом накопичення теплоти

Моделювання теплових процесів на основі енергобалансу функціонування децентралізованої системи теплозабезпечення з тепловим насосом та кумулятивним ефектом накопичення теплоти виконано для будівлі громадського призначення, якою є навчальний корпус №10 Одеської політехніки. До енергобалансу входять теплові втрати крізь стіни, теплота від ЗВДЕ до ТН, теплові надходження від мешканців і електроприладів Кількість теплоти, що накопичується в зовнішніх і внутрішніх стінах будівлі, призводить до додаткового кумулятивного ефекту накопичення теплоти. Отже, при моделюванні теплових процесів на основі енергобалансу кількість теплоти, що накопичується в стінах будівлі, обов'язково має бути врахована як засіб акумулювання теплоти, що додається до БА системи.[40 – 44, 50, 53]. Вказані потоки теплоти, що входять в енергобаланс наведено на рисунку 3.5, де показані всі елементи системи, потоки енергії, пристрої вимірювання та керування [50, 53, 74].

Динамічна модель енергобалансу відрізняється набором лінійних рівнянь n×n, які можна швидко розв'язати на кожному кроці часу, де n – це кількість теплових

вузлів, які розглядаються в моделі, включно з повітрям у приміщенні. Зміна температури у вузлах є функцією кліматичних чинників, якими є температура зовнішнього повітря, інтенсивність інсоляції, температура неба, кількість теплоти, яка надходить від людей, електроприладів нагріву і освітлення (Додаток Є, рисунок Є.2) та процеси теплообміну, що притаманні елементам ДСТ. Додаткова теплота, яка надходить від скидних потоків системи, визначається за допомогою додаткових лінійних рівнянь, які додаються до загальних рівнянь моделі, де фенкойли є тепловими пристроями (Додаток Є, рисунок Є.3).

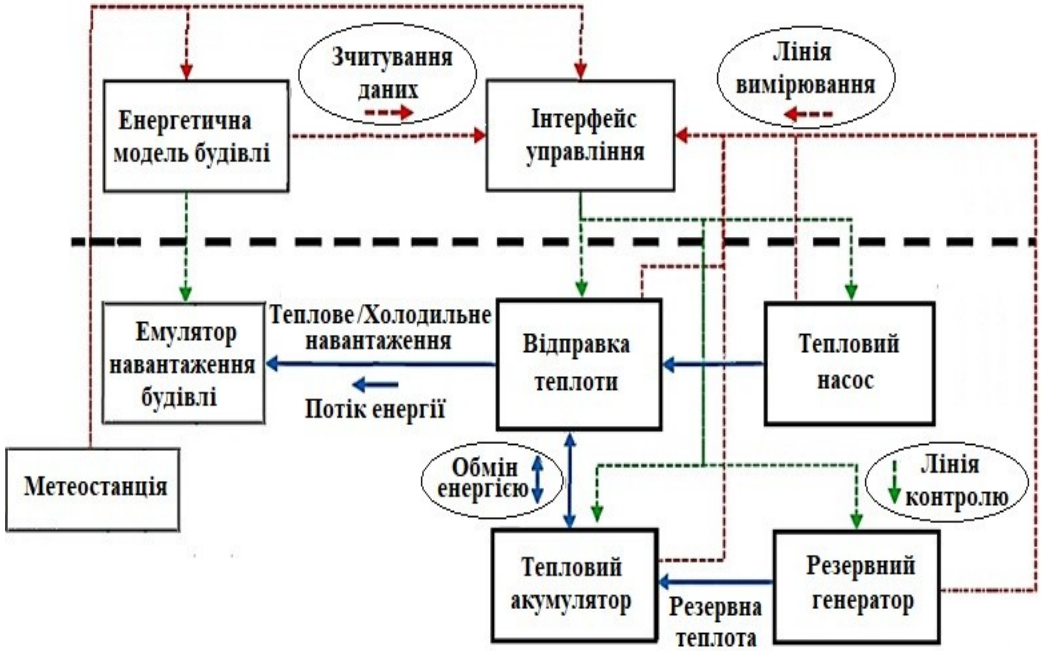

Рисунок 3.5 – Блок-схема енергобалансу ДСТ з ТН і ТА

Ефективність теплопередачі моделюється за допомогою методів теорії теплообміну [75 – 84]:

$$\begin{cases} Q_{FC}^{/} = m_f^{/} c_f \, (T_{f,in} - T_{f,out}) \\ Q_{FC}^{/} = m_{a,vel}^{/} c_a \, (T_{a,out} - T_{a,in}) \\ Q_{FC}^{/} = (UA)_{vel} \overline{\Delta T}_{f,a} \end{cases}, \tag{3.23}$$

Рівняння (3.23) дозволяють представити кожну з величин $Q_{FC}^{/}, T_{a,out}$ та $T_{f,out}$ як функцію: температури повітря на вході $T_{a,in}$, температури води на вході $T_{f,in}$, витрати повітря $m_{a,vel}^{/}$, витрати води $m_f^{/}$ та коефіцієнта теплопередачі $(UA)_{tot,vel}$,

який є паспортною характеристикою, що надається виробником ТН.

Нижні індекси, які використані для коефіцієнта $(UA)_{tot,vel}$, узгоджені зі швидкостями фенкойлу (висока, середня, низька). Коефіцієнт потужності F_C і відповідний приріст теплоти для вузла надходження повітря в приміщення оцінюються зі щогодинним кроком. Якщо $\overline{\Delta T_{f,a}}$ апроксимувати з урахуванням різниці температур води і повітря в лінійному рівнянні (3.22), то його можна розв'язати та долучити до загальної моделі енергобалансу.

Система тепловіддачі моделюється як два додаткових теплових вузла: $T_{f,in}$ та $T_{f,out}$ у тепловій мережі будівлі.

При цьому, температура $T_{f,in}$ відповідає виміряній температурі рідини на вході будівлі, а температура $T_{f,out}$ є невідомою і має бути визначена для кожного годинного кроку. Характеристики фенкойлу (FC) зведені в таблицю 3.3. Ціллю випробувань було визначення характеристик ТН з тепловим акумулюванням при функціонуванні децентралізованої системи теплозабезпечення протягом опалювального періоду, які залежать від таких впливових чинників: регіональних кліматичних параметрів, теплової інерції споруди, витрат води в контурі *FC*, витрати повітря та характеристик компресора, що забезпечує тиск. Дослідження виконувалось для різних режимів роботи ДСТ.

Таблиця 3.3 – Параметри *FC*

Характеристики контуру	Швидкість *FC*		
	Максимальна	Середня	Мінімальна
Теплопродуктивність, кВт	1	0.74	0.53
Витрата води, л/год	170	125	90
Витрата повітря, м^3/год	174	119	83

Температура в приміщенні 20 °С, термостат керував включенням/вимкненням теплового насосу, при цьому для визначення теплопродуктивності генератора теплоти досліджено такі режими роботи контуру FC: 1) при температурі подачі 40 ◦С і середній швидкості FC; 2) при температурі подачі 40 ◦С і мінімальній швидкості FC; 3) при температурі подачі 35 ◦С і

мінімальній швидкості FC. Обидва коефіцієнти $COP(T_{out,HP}; T_{a,in,HP}; R_C)$ і COP_S рівняннях (3.18) і (3.19), відповідно, дозволяють визначати ефективність ТН та ДСТ. Коефіцієнт трансформації COP_S дозволяє оцінити також вплив теплових втрат в трубопроводах.

3.7. Аналіз результатів досліджень ефективності децентралізованої системи теплозабезпечення з ТН та баком-акумулятором теплоти при переривчастому режимі функціонування

Чисельне моделювання системи переривчастого теплопостачання виконано для будівлі громадського призначення – навчального корпусу «Одеської політехніки». Аналіз результатів чисельного моделювання режимів ДСТ з використанням ТН, теплового акумулятора (рисунок 3.6) при температурі навколишнього повітря мінус 18 °С, виявив безумовну перевагу використання теплового акумулятора для підвищення ефективності теплонасосного генератора теплоти. Загальна площа чотирьох поверхів навчального корпусу становить 1500 м^2, а об’єм 4800 м^3 [51, 53, 54].

При функціонуванні ДСТ з використанням ТН і ТА в переривчастому режимі (рисунок 3.6), теплота, яка накопичується в ТА визначається кумулятивно площею (1) з лівої сторони графіка та площею (1) з правої сторони графіка теплопродуктивності системи в неробочому, перехідному і резервному режимах роботи. Теплота, що накопичується протягом зарядки теплового акумулятора показана площею (2) , при цьому, виявилось, що досягнутого рівня теплової спроможності бака-акумулятора, навіть більше потреб споживачів. Отже, покриття дефіциту кумулятивної теплоти (дві зони 1) відбувається за рахунок використання ТА (зона 2).

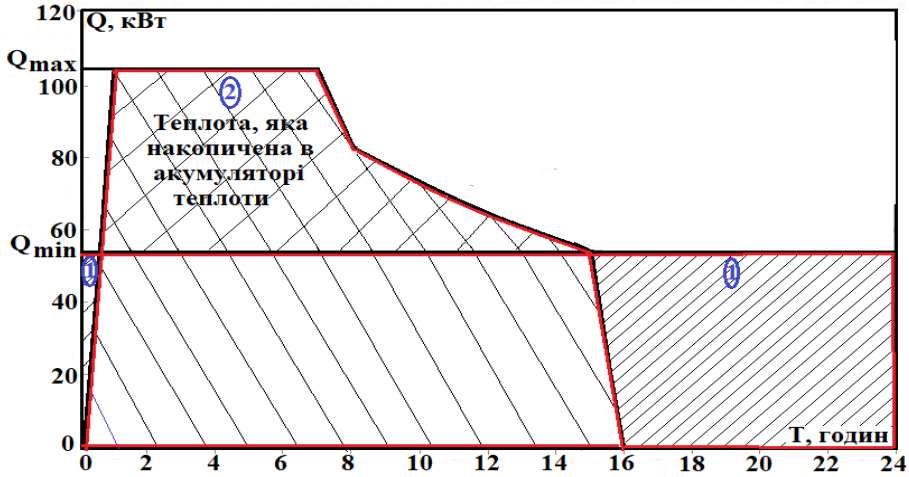

Рисунок 3.6 – Теплопродуктивність ДСТ з ТН та ТА:

1 – теплопродуктивність в черговому режимі;

2 – теплота, що забезпечується тепловим акумулятором

Таким чином, при переривчастому режимі функціонуванні ДСТ з використанням ТН і ТА, система працює з Q_{min} мінімальною теплопродуктивністю на рисунку 3.7 це точка А, а об'єм бака-акумулятора становить $V = 19$ м^3 при температурі довкілля -18 °С.

Коефіцієнт зменшення теплової потужності ТН k в цьому режимі функціонування ДСТ дорівнює частці заміщення теплопродуктивності системи шляхом раціонального використання накопиченої теплоти в баці-акумуляторі:

$$k = \frac{Q_i}{Q_{max}}, \tag{3.24}$$

де Q_i – поточна потужність ТН, кВт;

Q_{max} – максимальна потужність ТН в режимі форсування режиму нагріву приміщень при вмиканні ТН в робочий режим, коли необхідно застосовувати режим натопу, щоб забезпечити потреби споживачів, кВт.

Важливим показником енергоефективності застосування теплового акумулятора є спроможність досягти ефекту енергозбереження за рахунок використання ТА при періоді до робочого режиму ДСТ.

Коефіцієнт $\overline{v}$ визначається за формулою:

$$\overline{v} = \frac{V_{Qmin}}{V_{Qmax}}, \tag{3.25}$$

де V_{Qmin} – об'єм БА при мінімально допустимій теплопродуктивності системи, тобто в період акумулювання теплоти, м^3;

V_{Qmax} – об'єм ТА при максимальній теплопродуктивності системи, яка необхідна в період форсування нагріву приміщень, м^3.

Фізичний зміст коефіцієнту $\overline{v}$ міститься у співвідношення об'єму ТА V_{Qmin}, здатного замістити теплову потужність системи в режимі натопу та максимального об'єму ТА V_{Qmax}, необхідного при роботі ДСТ з максимальною тепловою ефективність. Аналіз характеру зміни впливових параметрів $\overline{v} = f(k)$ при t_{oc} = – 18 ºС при переривчастому режиму роботи ДСТ, представлений на рисунку 3.7 кривими 1, 2 , дозволив зробити такі висновки:

– зміна теплового потенціалу генератора теплоти (крива 1) в неробочий період має висхідний характер, бо в цей період відбувається акумулювання теплоти;

– зміна теплового потенціалу бака-акумулятора (лінія 2) в період натопу має низхідний характер, бо в цей період відбувається витрата накопиченої теплоти в ТА на форсування режиму нагріву при включені системи в роботу.

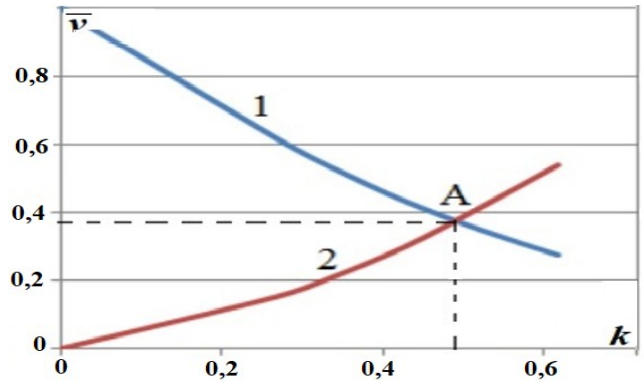

Рисунок 3.7 – Залежність об'єму БА $\overline{v}$ від коефіцієнта зменшення теплової потужності ТН k при переривчастому режимі роботи ДСТ:

1 – потенціал генератора теплоти в неробочому режимі;

2 – дефіцит потужності, що покривається за рахунок ТА

Точка А на перетині графіків 1 та 2 відповідає ємності акумулятора теплоти, який спроможний до покриття теплових потреб в режимі форсуванні нагріву приміщень при переході ДСТ в робочий режим. Таким чином, точка А, яка

міститься на рисунку 3.7) визначає умови ефективного функціонування ДСТ з використанням ТН на базі ЗВДЕ та теплового потенціалу акумулятора теплоти, що гарантується максимальним значенням коефіцієнта φ – акумуляційного параметру заміщення теплової потужності генератора теплоти за рахунок раціонального використання БА.

Акумуляційний параметр φ заміщення теплової потужності ДСТ з ТН і ТА за рахунок використання теплового акумулятора, який впливає на рівень заміщення теплового навантаження становить:

$$\varphi = \frac{V_{Qmin}}{Q_{\text{ном}} - Q_{min}}. \quad (3.26)$$

Фізичний зміст параметра заміщення полягає в тому, що φ визначає об'єм ТА, який необхідно забезпечити при функціонуванні ДСТ в переривчастому режимі, щоб отримати максимальний коефіцієнт заміщення теплового навантаження за рахунок потенціалу акумулятора теплоти при максимальній теплопродуктивності системи теплозабезпечення. Акумуляційний параметр заміщення теплової потужності вказує оптимальні умови використання накопичувачів теплоти в гібридній теплонасосній системі.

Наприклад, для системи теплопостачання будівлі громадського призначення, якою є навчальний корпус 10 «Одеської політехніки» встановлено:

$Q_{\text{ном}} = 70$ кВт; $Q_{min} = 53$ кВт ; $V_{Qmin} = 19$ м^3 ; $\varphi = 1{,}18$ м^3/кВт.

Отримані теоретичні та експериментальні результаті дозволили обґрунтувати раціональні умови роботи теплонасосної системи з використанням бака-акумулятора теплоти як для перманентного, так і для переривчастого функціонування децентралізованої системи теплопостачання. Для переривчастого режиму ефективність ДСТ покращується при мінімальній швидкості FC і температурі $T_{f,out} = 35$ ◦С. При цьому робота ТН вночі характеризується тривалістю 8,5 годин, а середня теплопродуктивність ТН протягом періодів увімкнення зменшується 2,8 разів і ДСТ досягає стану узгодженості теплового балансу з потребами споживачів в теплозабезпеченні. Втрати контуру нагріву зменшуються через відсутність необхідності додаткового підігріву при вимкнені

ТН. Вказані умови зменшують неефективність через цикли включення/вимкнення ТН, отже, сезонний *COP* покращується.

Для переривчастого режиму функціонування ДСТ одержані результати щодо доцільності використання ТН з ТА, свідчать, що наявність теплового акумулятора забезпечує більшу енергоефективність і надійність системи. Використання ТА в системі є позитивним засобом для зниження максимальної потужності ТН як генератора теплоти за рахунок раціонального використання енергетичного потенціалу ТА.

Аналіз впливу теплового потенціалу ТА, який заряджається в періоди простою ТН, та надлишку теплоти, яка накопичена в ТА, і здатна забезпечити режим натопу, дозволив встановити співвідношення між потужність теплогенератора і ємністю БА при спільній роботі ТН з ТА в режимі опалення, які призводять до зменшення втрат теплоти при використанні ДСТ з урахуванням рівня термомодернізації будівлі.

3.8. Висновки до розділу

1. Теплова і економічна ефективність гібридної системи теплопостачання з сонячними колекторами і акумуляторами теплоти залежить від конструктивних і режимних факторів – температури нагріву води в теплообміннику попереднього підігріву води котла.

2. Для забезпечення ефективної взаємодії СК як теплообмінника попереднього підігріву води котла запропонована раціональна конструктивна схема гібридної системи теплопостачання з сонячними колекторами і акумуляторами теплоти.

3. Запропоновано методику розрахунку ефективності використання гібридної системи теплопостачання з сонячними колекторами для попереднього підігріву води для котла і акумуляторами теплоти.

4. Визначено собівартість теплоти, згенерованої гібридною системою з сонячними колекторами і акумуляторами теплоти в функції температури нагріву води в СК, з урахуванням їх питомої вартості СК. Визначено річний економічний

ефект від використання гібридної системи підготовки води для котла в СК і акумуляторах теплоти. Встановлено характер впливу на собівартість виробленої теплоти та на її економічну ефективність питомої вартості СК.

5. Виконано оцінку економічної і екологічної ефективності за програмою RETScreen для м. Одеси. Встановлено, що загальні витрати на практичну реалізацію ДСТ з СК площею $A_{СК} = 4$ м^2 і акумулятором теплоти становлять 1838 USD, а термін окупності – 5 років. Річне зниження емісії CO_2 при впровадженні СК з ТА для попереднього підігріву води для котла становить 0,31 т/рік.

6. Запропоновано математичну модель оцінки енергоефективності ДСТ з використанням ТН на базі ЗВДЕ і теплових акумуляторів, які відповідають вимогам енергозберігаючих технологій. Визначено ефективність теплонасосної системи в регіональних кліматичних умовах, коли температура бівалентної точки визначає кількість енергії, яка надходить від традиційного теплогенератора. Для теплонасосних систем з тепловим акумулятором відбувається вирівнювання кривої навантаження теплогенераторів, що призводить до більш рівномірної роботи джерела теплоти.

7. За результатами чисельного моделювання та експериментальних даних визначено ефективність теплонасосної системи з акумулятором теплоти в різних режимах теплопостачання з урахуванням кліматичних умовах. Зіставлення результатів чисельного моделювання процесів в елементах ДСТ з використанням ТН і акумулятора теплоти з експериментальними даними дозволило встановити умови ефективного функціонування децентралізованої системи теплопостачання з максимальною часткою заміщення теплопродуктивності генератора теплоти за рахунок накопичення теплоти в баці-акумуляторі.

Застосування інструментарію вибору раціональних умов функціонування ДСТ з урахуванням параметра заміщення теплоти при використанні ТА дозволило досягти зниження середньої теплопродуктивності ТН в 2,8 разів для будівель громадського призначення.

РОЗДІЛ 4
ІНСТРУМЕНТАРІЙ ДЛЯ ВИРІШЕННЯ РІВНЯННЯ ТЕПЛОВОГО БАЛАНСУ ТЕПЛОНАСОСНОЇ СИСТЕМИ З УРАХУВАННЯМ ГІБРИДНИХ ЗАСОБІВ НАКОПИЧЕННЯ ТЕПЛОТИ

4.1. Математична модель теплових процесів в об'єкті теплопостачання з використанням гібридних засобів акумулюванням теплоти

Визначимо вплив акумулювання теплоти стінами, що при децентралізованому теплопостачанні з використанням ТН на базі ЗВДЕ та теплових акумуляторів, не потребує додаткових капітальних внесків в систему.

Таке гібридне поєднання різних засобів акумулювання теплоти створює кумулятивний ефект енергозбереження, підвищуючи техніко-економічну доцільність використання ДСТ.

Для визначення частки внеску в енергозбереження при використанні децентралізованих систем теплозабезпечення автономних споживачів, на базі ТН, ЗВДЕ та теплових акумуляторів, шляхом кумулятивного ефекту від акумулювання теплоти стінами будівлі, необхідно виконати чисельне моделювання розподілу температури в огородженнях будівлі при добових змінах температури навколишнього повітря протягом опалювального сезону, що дозволить встановити частку корисного гібридного ефекту від всіх засобів акумулювання теплоти.

Математична модель теплових процесів, що відбуваються безпосередньо в об'єкті теплопостачання, дозволяє розрахувати змінну в часі теплову потужність $Q_T(t)$, яка необхідна для задоволення потреб споживача тепла та підтримки постійного рівня заданого мікроклімату в приміщеннях, з урахуванням всіх досяжних кумулятивних засобів накопичення теплоти (КЗНТ) в об’єкті теплозабезпечення.

У загальному випадку, рівняння теплового балансу децентралізованого теплозабезпечення представлено такою формулою:

$$V_B \cdot c_p \cdot \rho_B \cdot \frac{dT_B}{dt} = Q_T(t) - \sum Q_{CT}(t) - \sum Q_{OK}(t) - Q_{BEHT}(t), \quad (4.1)$$

де T_B , c_p, ρ_B – температура, теплоємність, густина повітря всередині приміщень будівлі, відповідно;

t – час;

$Q_T(t)$ – потужність теплового потоку для цілей теплозабезпечення;

$\sum Q_{CT}(t)$ – втрати теплоти крізь стіни;

$\sum Q_{OK}(t)$ – втрати теплоти крізь вікна;

$Q_{BEHT}(t)$– втрати теплоти вентиляцією.

Зазначене рівняння теплового балансу стосується повітрообміну внутрішньої частини будівлі з навколишнім середовищем, де зовнішні, внутрішні стіни та перекриття характеризуються здатністю акумулювати теплоту, що має бути враховано при складені теплового балансу. Залежно від співвідношення між величинами значень температури огороджень будівлі та навколишнього середовища, теплота буде підводитись до стін з довкілля чи відводитись від стін у навколишнє середовище $Q_{CTi} > 0$.

Введемо умовні індекси-позначення для зовнішніх стін будівлі i = 1; для стелі над верхнім поверхом i = 2; для стелі над підвалом i = 3; для внутрішніх стін i = 4, а також для міжповерхової стелі i = 5.

Будемо вважати початковою умовою таку, для якої температура повітря всередині всіх приміщень будівлі становить T_B = *const*, тобто є постійною в просторі та часі. Це означає, що швидкість зміни температури протягом часу дорівнює нулю. З урахуванням початкових умов, для лівої частини рівняння теплового балансу (4.1) можна записати таке рівняння:

$$V_B \cdot c_p \cdot \rho_B \cdot \frac{dT_B}{dt} = 0. \quad (4.2)$$

На практиці ця умова означає, що в приміщенні будуть перманентно підтримуватися на належному рівні комфорту мікрокліматичні умови для

споживачів напротязі всього терміну функціонування системи [43, 44, 51, 53]. З урахуванням того, що належні комфортні умови підтримуються у всіх приміщеннях при децентралізованому теплозабезпеченні, рівняння теплового балансу зводиться до вигляду:

$$Q_T(t) = \sum Q_{CT}(t) - \sum Q_{OK}(t) - Q_{\text{ВЕНТ}}(t). \quad (4.3)$$

Переходимо до визначення практичної значимості результатів аналізу рівняння теплового балансу, для чого виконаємо детальний аналіз всіх компонентів правої частини рівняння (4.3).

Теплові втрати вентиляцією. Оскільки при розрахунку теплових втрат вентиляцією $Q_{ВЕНТ}$ ми припускаємо, що об'єм повітря в усіх приміщеннях будівлі V_B є постійною величиною протягом часу, а також з урахуванням того, що температура в приміщенні підтримується сталою (T_B = const). Тоді потужність потоку теплоти, що вилучається з вентильованим повітрям, є функцією температури навколишнього повітря $T_H(t) = var$, яка є змінною величиною протягом терміну функціонування системи [44], то згідно рівняння (4.4):

$$Q_{\text{ВЕНТ}}(t) = V_{\text{В}} \cdot c_p \cdot \rho_{\text{В}} \cdot [T_B - T_H(t)]\,. \quad (4.4)$$

Теплові втрати крізь вікна Q_{OK}.

Розраховуючи тепловтрати крізь вікна, будемо вважати, що всі вікна виготовлені за однаковою технологією і не відрізняються за тепловою інерцією відносно потоку сонячного випромінювання, яке надходить. Тоді потужність теплового потоку, що втрачається крізь вікна, дорівнює:

$$Q_{OK}(t) = k_{OK} \cdot F_{OK} \cdot [T_B - T_H(t)]\,, \quad (4.5)$$

де k_{OK} – коефіцієнт теплопередачі;

F_{OK} – площа всіх вікон, які наявні в будівлі.

Теплові втрати крізь стіни $\sum Q_{CTi}$.

Прийнята умова постійної температури в приміщеннях будівлі $T_{\text{В}}$ = const означає, що теплообміну між внутрішніми стінами та перекриттями немає, тобто внутрішні стіни та міжповерхові перекриття всередині будинку не акумулюють

теплоту. Ця умова, яка ураховується в індексах-позначеннях, може бути виражена такими рівняннями:

$$\begin{cases} Q_{CT4} = 0 \\ Q_{CT5} = 0 \end{cases}. \quad (4.6)$$

Визначаючи кумулятивні теплові втрати в довкілля крізь всі стіни, які огороджують будівлю, будемо вважати, що підтримуються такі умови:

– різниця температур ΔT_p між повітрям в середині холодного приміщення T_h, тобто в приміщенні, яке не опалюється, та температурою зовнішнього повітря T_H є постійною величиною, що виражається рівнянням:

$$\Delta T_p = T_h - T_H; \quad (4.7)$$

– втрати теплоти у напрямку від стелі до приміщень, які розташовані на нижньому рівні будівлі (i =3), відсутні, тобто Q_{CT3}=0.

Отже, сумарні втрати теплоти крізь стіни в довкілля $\sum_{i=3}^{5} Q_{CT}$ зводяться до необхідності урахування втрат теплоти від двох джерел $\sum_{i=1}^{2} Q_{CTi}$ від зовнішніх стін Q_{CT1} та зовнішньої стелі Q_{CT2}, тобто справедливим є рівняння:

$$\sum_{i=1}^{5} Q_{CTi} = \sum_{i=1}^{2} Q_{CTi}. \quad (4.8)$$

Для зовнішніх стін будівлі, з урахуванням здатності цих стін до акумулювання теплоти, тепловий потік, що відводиться від стін $\sum_{i=1}^{2} Q_{CTi}$ дорівнює:

$$\sum_{i=1}^{2} Q_{CTi} = \sum_{i=1}^{2} \alpha_B \cdot F_{CT} \cdot [T_B(t) - T_{CT}(t)|B], \quad (4.9)$$

де α_B – коефіцієнт тепловіддачі від повітря всередині приміщення до стіни;

F_{CT} – площа поверхні стін будівлі.

$T_{CT}(t)|_B$ – температура стіни всередині будівлі, тобто з теплого боку стіни.

Рівняння (4.9) для визначення теплового потоку, що відводиться від стін, враховує теплообмін між повітрям всередині будівлі та її стінами.

Це рівняння можна розв'язати за умов, коли відома температура стіни $T_{CT}(t)|_B$ в середині приміщення, тобто з теплого боку стіни. Вказана температура залежить від зміни температурного поля в стіні та теплофізичних характеристик процесу теплообміну між стіною та навколишнім середовищем.

Для того, щоб визначити розподіл температури по товщині стіні, з урахуванням добових змін температури навколишнього повітря протягом сезону опалення, з урахуванням поставленої мети визначення гібридного впливу *акумулювання теплоти стінами*, приймемо наступні припущення:

– стіни мають однорідну та ізотропну структуру;

– нестаціонарний теплообмін у стінах є одновимірним;

– вплив вологості стіни не враховується;

– вплив вітру не враховується.

Ці припущення дозволяють виконати чисельне моделювання розподілу температур в стіні будівля, яку будемо вважати пластиною нескінченної довжини без внутрішніх джерел теплоти, яка має скінчену товщину δ, і рівномірний розподіл температури по її поверхні.

З урахуванням вказаних припущень температурне поле можна визначити рівнянням нестаціонарного теплообміну:

$$\frac{\partial T_{CTi}}{\partial t_{CTi}} = \alpha_{CT} \frac{\partial^2 T_{CTi}}{\partial x_{CTi}{}^2}, \tag{4.10}$$

де α_{CTi} – коефіцієнт температуропровідності *i*-ої стіни;

T_{CTi} – температура *i*-ої стіни вздовж координатної осі x.

Рівняння (4.10) можна розв'язати, якщо відомі всі коефіцієнти теплопередачі та теплопровідності внутрішніх та зовнішніх поверхонь, що беруть участь у теплообміні з навколишнім середовищем.

Температурне поле в стіні у графічній формі, яка характерна для випадку розподілу температури в нескінченно довгій однорідній пластині кінцевою товщиною δ, показано на рисунку 4.1

Розглянемо початкові умови процесу теплопередачі для визначення поля температур в стінах будівлі для визначення гібридного кумулятивного ефекту накопичення теплоти в умовах нестаціонарного теплообміну.

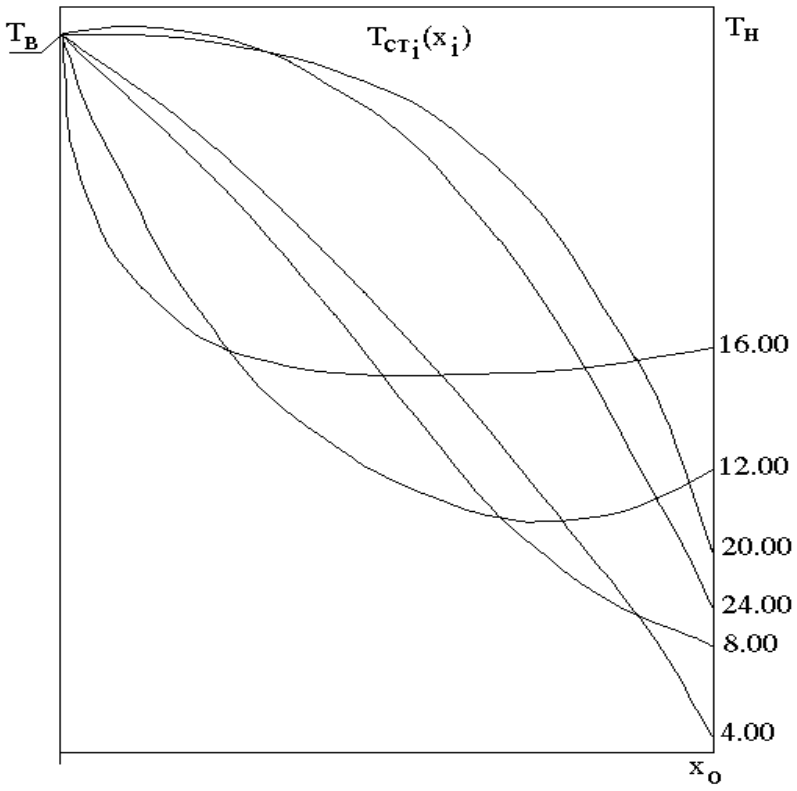

Рисунок 4.1 – Характер зміна поля температур в стіні протягом доби

Розподіл температур в початковий момент часу $t_0 = 0$ вздовж осі x матиме такий вигляд:

$$T(x_0,t_0) = T_0(x, 0) = f_0(x).$$

Будемо вважати, що розподіл температури як у стінах, так і у стелях будівлі у початковий момент часу має лінійний характер, і за початкову точку зміни температури вздовж осі x візьмемо внутрішню поверхню стіни з теплої її сторони.

Враховуючи наведені вище припущення та позначення, отримаємо рівняння, яке дозволяє визначити розподіл температур всередині *i-oї* стіни:

$$T_{0CTi}(x_{CTi}) = f_{0CTi}(x_{CTi}) = T_B - \frac{T_B - T_H(t_0)}{\delta_{CT}} \cdot x_{CTi}. \qquad (4.11)$$

З іншого боку, процес теплообміну на зовнішній та внутрішній межі стіни для довільного моменту часу можна представити за допомогою граничних умов третього роду в такому вигляді:

– гранична умова третього роду для *i*-ої внутрішньої межі стіни, тобто з внутрішнього боку житлового приміщення:

$$-\lambda_{CTi}\frac{\partial T_{CTi}}{\partial t_{CTi}}|B = \alpha_B[T_B - T_{CTi}(t)|B]\ ; \qquad (4.12)$$

– гранична умова третього роду для і-ої зовнішньої межі стіни, тобто зі сторони навколишнього середовища:

$$-\lambda_{CTi}\frac{\partial T_{CTi}}{\partial t_{CTi}}|H = \alpha_{Hi}[T_{CTi}(t)|H - T_{Hi}(t)]\ . \qquad (4.13)$$

де λ_{CTi} – коефіцієнт теплопровідності *i-о*ї стіни;

α_{Hi} – коефіцієнт теплопередачі від зовнішньої межі *i-о*ї стіни, де, враховуючи індекси-позначення, *i = 1* – відноситься до зовнішньої межі стіни, а *i* = 2 – до зовнішньої межі стелі горища, Вт/(м·К);

T_{Hi} – температура повітря, яка приймається для границь *i = 1* та *i = 2* відповідно;

$T_{Hi}(t) = T_H(t)$ – температура на зовнішній межі стіни;

$T_{H2}(t) = = T_H(t) + T_h$ – температура в горищному приміщенні під дахом будівлі, відповідно, з урахуванням рівняння (4.7).

Коефіцієнти теплопровідності λ_{CTi}, що входять до складу рівнянь (4.12 – 4.13), та коефіцієнт температуропровідності α_{CT}, що входить до складу рівняння (4.10), залежать від конструкційного матеріалу стін будівлі. Ці коефіцієнти можна вважати постійними в просторі та часі, як і коефіцієнти теплопередачі від внутрішнього повітря до стіни α_B та від стіни до зовнішнього повітря α_{Hi}.

Для розв'язання рівняння нестаціонарної теплопередачі (4.10), з урахуванням рівнянь (4.11 – 4.13), які містять початкові граничні умови та граничні умови третього роду, відповідно, скористаємося методом скінченних різниць (метод сітки) [84], тобто трьох параметричним методом, який є теоретичним стійким чисельним методом дослідження.

Виконаємо апроксимацію частинні похідні, які входять до диференціального рівняння теплопровідності та граничних умов (4.12–4.13), скінченними різницями, записаними для точок, розташованих у вузлах сітки (рисунок 4.2) [44, 53, 84, 85].

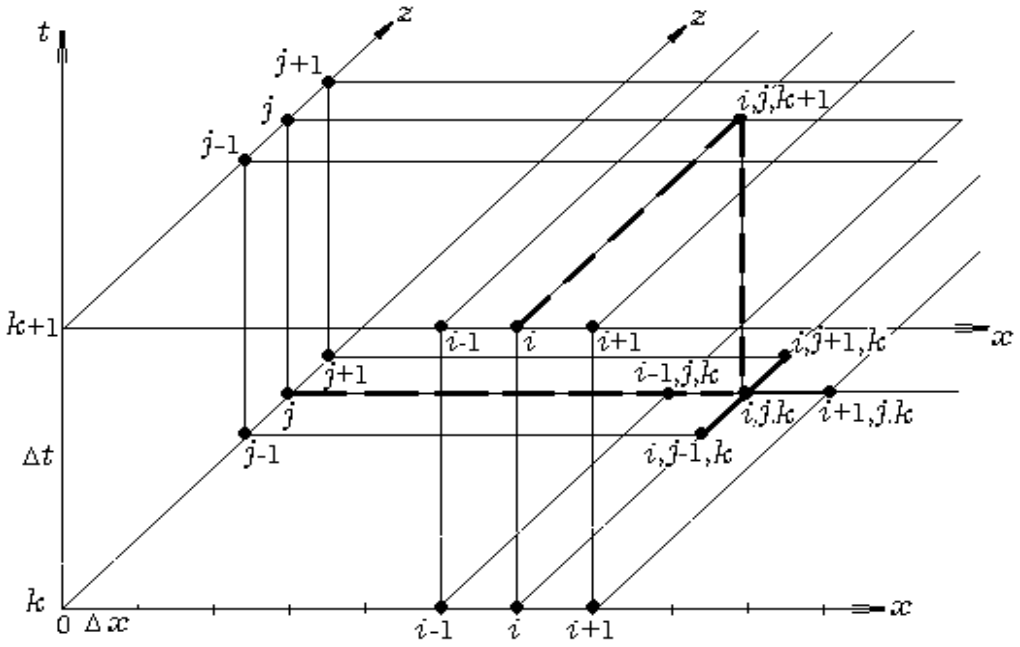

Рисунок 4.2 – Елементарний об'єм у вигляді просторово-годинної сітки

Оскільки диференціальне рівняння теплопровідності у вигляді скінченних різниць пов'язує значення шуканої функції температури, представленої в дискретній формі, з відповідними координатами вузлів сітки, то температуру $T(x_i, t_{j+1})$ у вузлі сітки x_i на вибраному рівні часу t_{j+1} можна обчислити за температурами рівнями в сусідніх вузлах сітки, які відповідають годинним рівням t_j та t_{j-1}.

Апроксимація диференціального рівняння (4.10) скінченними різницями дозволяє отримати рівняння у вигляді [44, 53]:

$$\frac{T_1^{j+1}-T_i^{j-1}}{2\Delta t}=\alpha_{CT}\cdot\frac{T_{1+1}^{j}+T_{i-1}^{j}-T_i^{j-1}-T_i^{j+1}}{\Delta x^2}, \tag{4.14}$$

звідки, після перетворень, можна представити формулу для розрахунку шуканої температури стінки T_{CT} у заданій площині часу, у вузлі з координатами (i) та ($j+1$) від початку координат сітки, у такому вигляді:

$$T_{CTi}^{j+1}=T_{CTi}^{j-1}\cdot\frac{1-2\frac{a_{CT}\cdot\Delta t}{\Delta x_{CT}^2}}{1+2\frac{a_{CTi}\cdot\Delta t}{\Delta x^2}}+\left(T_{CTi+1}^{j}+T_{CTi-1}^{j}\right)\frac{2\cdot\frac{a_{CT}\cdot\Delta t}{\Delta x_{CT}^2}}{1+2\frac{a_{CT}\cdot\Delta t}{\Delta x^2}}. \tag{4.15}$$

Введемо позначення $A_{CT}=2\cdot\frac{a_{CT}\cdot\Delta t}{\Delta x_{CT}^2}$, тоді для температури стінки T_{CTi}^{j+1}, можна записати рівняння (4.15) у більш спрощеному вигляді:

$$T_{CTi}^{j+1}=T_{CTi}^{j-1}\cdot\frac{1-A_{CT}}{1+A_{CT}}+\left(T_{CTi+1}^{j}+T_{CTi-1}^{j}\right)\frac{A_{CT}}{1+A_{CT}}. \tag{4.16}$$

Для рішення рівняння (4.16), необхідно ввести відповідні граничні умови. Представимо функцію температури у вузлах на внутрішній та зовнішній межах у вигляді розкладу в ряд Тейлора поблизу відповідних вузлів. Так, для внутрішньої межі ($x = x_0$) представимо функцію температури $T(x, z)$ поблизу вузлів, близьких до межі, у вигляді розкладання в ряд Тейлора [44].

Тоді першу похідну температурної функції T_{CT} у момент часу t_l+1 у вузлі і можна обчислити за допомогою співвідношення:

$$T_i^{j+1} = \frac{\partial T}{\partial x|x=x_0} = \frac{4T_2^{j+1} - 3T_i^{j+1} - T_2^{j+1}}{2\Delta x}. \quad (4.17)$$

Підставляючи значення першої похідної функції температури T′ у вузлі $(j+1,i)$ з рівняння (4.17) у формулу для граничних умов (4.12), отримуємо співвідношення для визначення температури T_{CT} на внутрішній поверхні для площини часу $(j+1)$ у вигляді:

$$T_{CTi}^{j+1} = \frac{T_B + \frac{\lambda_{CT}}{\alpha_B 2\Delta x_{CT}}\left(4T_{CT2}^{j+1} - T_{CT3}^{j+1}\right)}{1 + \frac{3\lambda_{CT}}{\alpha_B 2\Delta x_{CT}}}. \quad (4.18)$$

Аналогічно, апроксимуючи граничні умови (4.13) на зовнішній поверхні стінки скінченними різницями, отримуємо значення температури T_{CT} у вузлі n для площини часу $(j+1)$ у вигляді:

$$T_{CTn}^{j+1} = \frac{T_H + \frac{\lambda_{CT}}{\alpha_H 2\Delta x_{CT}}\left(4T_{CTn-1}^{j+1} - T_{CTn-2}^{j+1}\right)}{1 + \frac{3\lambda_{CT}}{\alpha_H 2\Delta x_{CT}}}. \quad (4.19)$$

Чисельне моделювання теплових процесів, у зазначених межах, для визначення нестаціонарного поля температур, виконано протягом довготривалого періоду. Втрати теплоти в довкілля крізь стіни та стелю будівлі визначались за формулою (4.18) х рівномірним інтервалом кожну годину.

Враховуючи прийняті припущення, а також рівняння (4.14), (4.15), (4.19), які є основою розв'язку балансового рівняння об'єкта теплопостачання (4.13), співвідношення для визначення потужності теплового потоку для цілей теплопостачання отримано у вигляді:

$$Q_T(t)= [V_B \cdot c_p \cdot \rho_B \cdot a + k_{OK} \cdot F_{OK}] \cdot [T_B - T_H(t)] +$$
$$+ \{\alpha_B \cdot F_{CT1} \cdot [T_B - T_{CT1}(t)\big|_B]\} + \{\alpha_B \cdot F_{CT2} \cdot [T_B - T_{CT2}(t)\big|_B]\} . \quad (4.20)$$

Отримане рівняння можна розв'язати, маючи відомий розподіл температури в часі $T_{CT1}|_B$ на поверхні зовнішньої стіни з боку опалювального приміщення та температуру $T_{CT2}|_B$ на поверхні зовнішньої стелі з боку опалювального приміщення. У свою чергу, для визначення цих температур необхідно знати розподіл температури в цьому бар'єрі з урахуванням граничних та початкових умов.

Наведені в розділі рівняння (4.9 – 4.20) є математичною моделлю теплових процесів, що відбуваються в об'єкті децентралізованого теплопостачання з кумулятивним ефектом від акумулювання теплоти стінами будівлі. Ці рівняння дозволяють розрахувати змінну в часі теплову потужність Q_T, яка необхідна для задоволення потреб споживачів теплоти та підтримки постійного рівня заданого мікроклімату в приміщенні.

4.2. Аналіз результатів чисельного моделювання ефективності децентралізованого теплопостачання при урахуванні кумулятивного ефекту накопичення теплоти стінами

Чисельне моделювання процесів теплообміну в об'єкті децентралізованого теплопостачання, зводиться до розрахунку динаміки втрат теплоти протягом опалювального сезону [44, 53], які входять до рівняння теплового балансу ОТ (4.3), що дозволяє розрахувати зміну теплового навантаження системи. Проаналізуємо одержані дані на прикладі результатів чисельного моделювання для жовтня. На рисунку 4.3 показано середньодобовий розподіл температури зовнішнього повітря в об'єкті децентралізованого теплопостачання на прикладі зміни температури довкілля протягом жовтня.

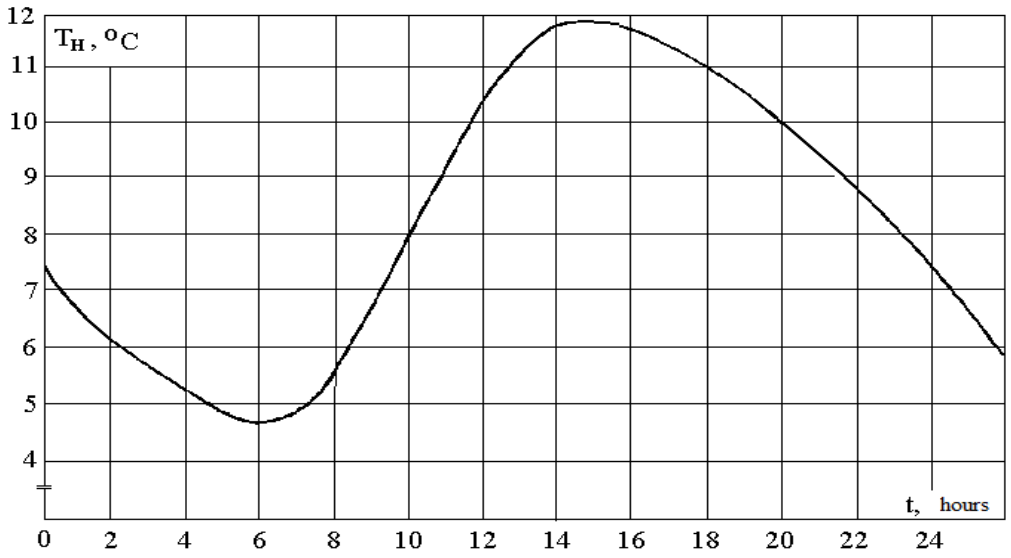

Рисунок 4.3 – Середньодобова температура зовнішнього повітря T_H

На рисунку 4.4 наведено результати розрахунків теплового навантаження об'єкта при децентралізованому теплопостачанні та його компонентів – загальні втрати теплоти вентиляцією та крізь вікна $Q_{ВЕНТ+ОК}$, крізь стіни $Q_{СТ}$ та стелю будівлі $Q_Т$ з урахуванням та без урахування акумулювання теплоти тепла стінами. Зазначені втрати тепла є функцією температури зовнішнього повітря $T_Н$.

Крім того, для порівняння наведено результати розрахунків теплового навантаження системи з урахуванням акумулювання теплоти стінами $Q_{СТ}$ та стелею $Q_П$ та аналогічні значення теплового навантаження системи без урахування акумулювання $Q'_{СТ}$ та $Q'_{П}$, відповідно.

Аналіз показує, що акумулювання теплоти стінами призводить до кумулятивного енергозберігаючого ефекту, що створює пом'якшувальний вплив на характер процесу теплообміну. При цьому, графіки коливань теплових втрат крізь стіни $Q_{СТ}$ та стелю $Q_П$ характеризуються меншою амплітудою протягом часу, що видно на графіках зміни потужності потоку теплоти, яка втрачається з внутрішньої теплої сторони будівлі в навколишнє середовище крізь стіни та стелі.

Теплові втрати крізь стелю $Q_П$ практично не змінюються протягом доби, але коливання тепловтрат крізь стіни $Q_{СТ}$ завдяки акумулюванню теплоти стінами явно згладжуються, у зрівнянні з $Q'_{СТ}$ – без акумулювання теплоти. Середнє значення

втрат теплоти з акумулюванням теплоти стінами протягом жовтня $Q_{СТ} = 0{,}66$, а $Q'_{СТ} = 0{,}76$, що в 1,15 раз більше. Тобто можна потреба тепловій потужності ДСТ зменшується.

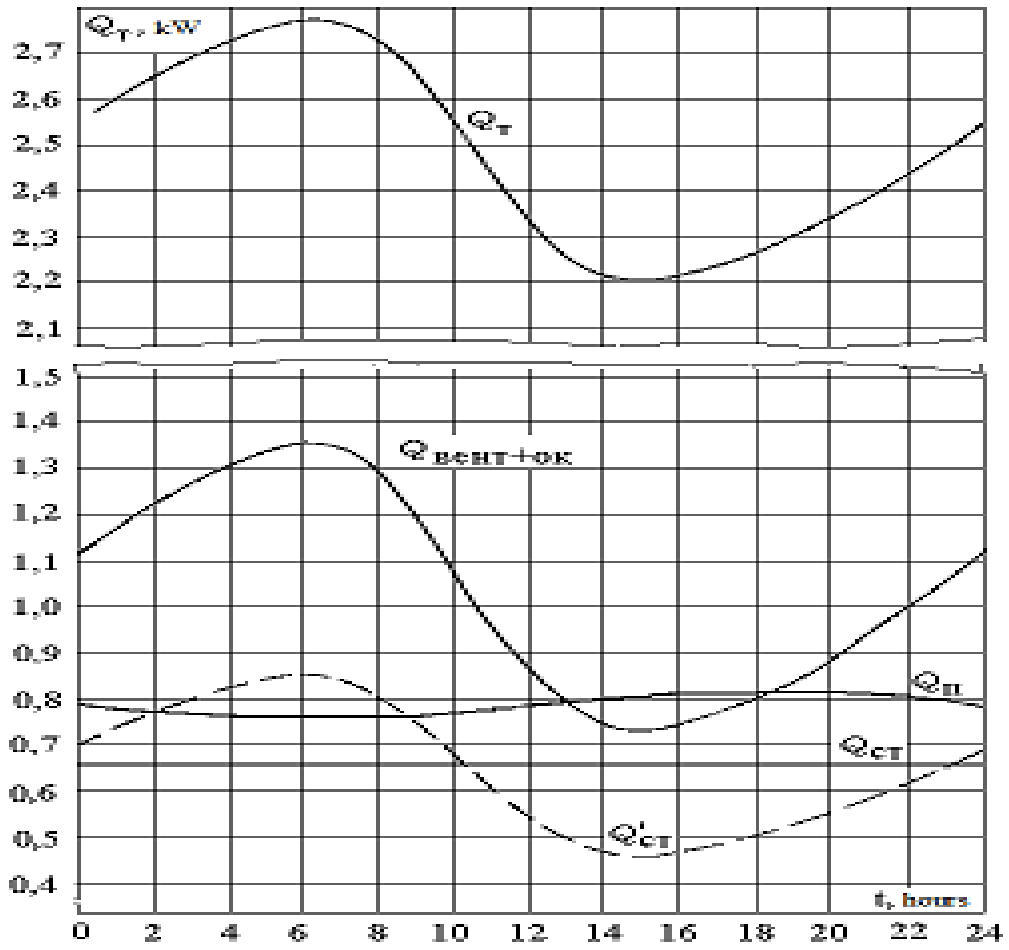

Рисунок 4.4 – Втрати теплоти і та добове теплове навантаження

Для порівняння, на рисунку 4.4 пунктирною лінією показано графік загальних втрат крізь стіни та стелі $Q'_{СТ+П}$ без урахування акумуляції теплоти стінами. Графік теплових втрат крізь стіни та стелі $Q'_{СТ+П}$ має чітко виражений синусоїдальний характер, протилежний за фазою графіку зміни температури навколишнього повітря T_H протягом доби (рисунок 4.3), фазове запізнення становить приблизно 12 годин.

У нічний період доби графік змін теплових втрат $Q'_{СТ}$ подібний до синусоїдальної кривої зміни теплових втрат вентиляцією та крізь вікна $Q_{ВЕНТ+ОК}$, що пояснюється головним чином змінами температури навколишнього повітря $T_Н$.

Очевидно, що значення заданих теплових втрат досягає свого максимуму протягом нічного періоду, що призводить до відповідного збільшення теплового навантаження системи $Q_Т$.

Аналіз результатів чисельного моделювання розрахунків показує, що при акумулюванні теплоти стінами в нічний період теплові втрати $Q_{СТ}$, які спричинені коливаннями температури навколишнього повітря $T_Н$, менші, бо амплітуда коливань потреб споживачів в тепловій потужності $Q_Т$ згладжується.

Таким чином, зміни тепловтрат з урахуванням акумулювання теплоти стінами $Q_{СТ}$, яка залежить від температури навколишнього повітря $Т_Н$, менш виражені при коливаннях потреб споживача в тепловій потужності $Q_Т$.

Аналіз результатів чисельного моделювання дозволяє зробити висновки, що акумулювання теплоти стінами будівлі в нічний період часу $Q_{СТ}$ можна вважати засобом акумулювання, що необхідно враховувати як гібридний кумулятивний ефект, який призводить до енергозбереження без додаткових капітальних витрат.

На рисунку 4.5 показано порівняння змін теплового навантаження у жовтні з урахуванням акумулювання $Q_Т$ та без урахування акумулювання тепла стінами будинку $Q'_Т$.

Суцільною лінією показано зміну теплового навантаження з урахуванням акумулювання теплоти стінами, а пунктирна лінія відповідає зміненню теплової потужності системи без урахування акумулювання теплоти стінами.

На графіках чітко простежується явний вплив акумулювання теплоти стінами на амплітуду коливань теплового навантаження – амплітуда коливань $Q_Т$ менша. У цьому випадку максимальна амплітуда спостерігається перед сходом сонця (при мінімальній температурі зовнішнього повітря $T_Н$), а мінімальна амплітуда коливань теплового навантаження відмічається близько полудня, приблизно о 14.30, тобто при максимальній температурі $T_Н$.

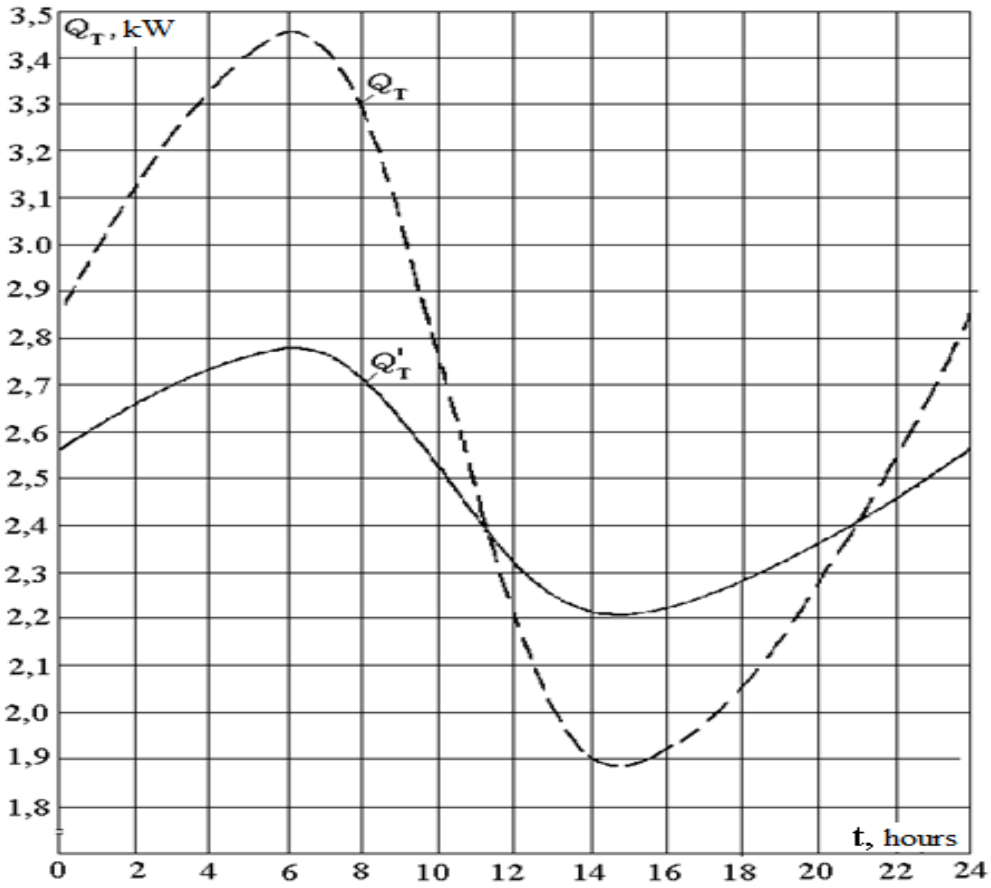

Рисунок 4.5 – Теплопродуктивність з акумулюванням теплоти стінами Q'_T та без акумулювання Q_T

Характер нестаціонарного теплообміну між стіною і довкіллям з урахуванням накопичення теплоти стінами Q'_T протягом доби показано на рисунку 4.6.

Графіки нестаціонарних процесів теплообміну в стіні, де температура через її товщину зменшується від внутрішньої межі до зовнішньої, що відповідає зміні перепаду температур між довкілля та всередині будівлі. Наведені результати чисельного моделювання, які виконані з інтервалом 6 годин, відносяться до середини жовтня, але варто зазначити, що температурні поля у стінах будівлі для інших місяців опалювального періоду мають подібний характер.

Аналіз зміни температури $T_{CTi}(x)$ по товщині стіни δ (рисунок 4.6) показує, що о 13:00 графік має найбільшу кривизну, особливо біля зовнішньої стіни, але з часом графік лінеаризується о 19:00. Підвищення температури біля зовнішньої межі о 13:00, пояснюється акумулюванням теплоти в стіні. Змінний характер поля

температур в стінах впливає на параметри мікроклімату приміщень, які мають бути постійними протягом часу, що викликає неминуче коливання теплопродуктивності ДСТ протягом опалювального сезону (рисунок 4.7).

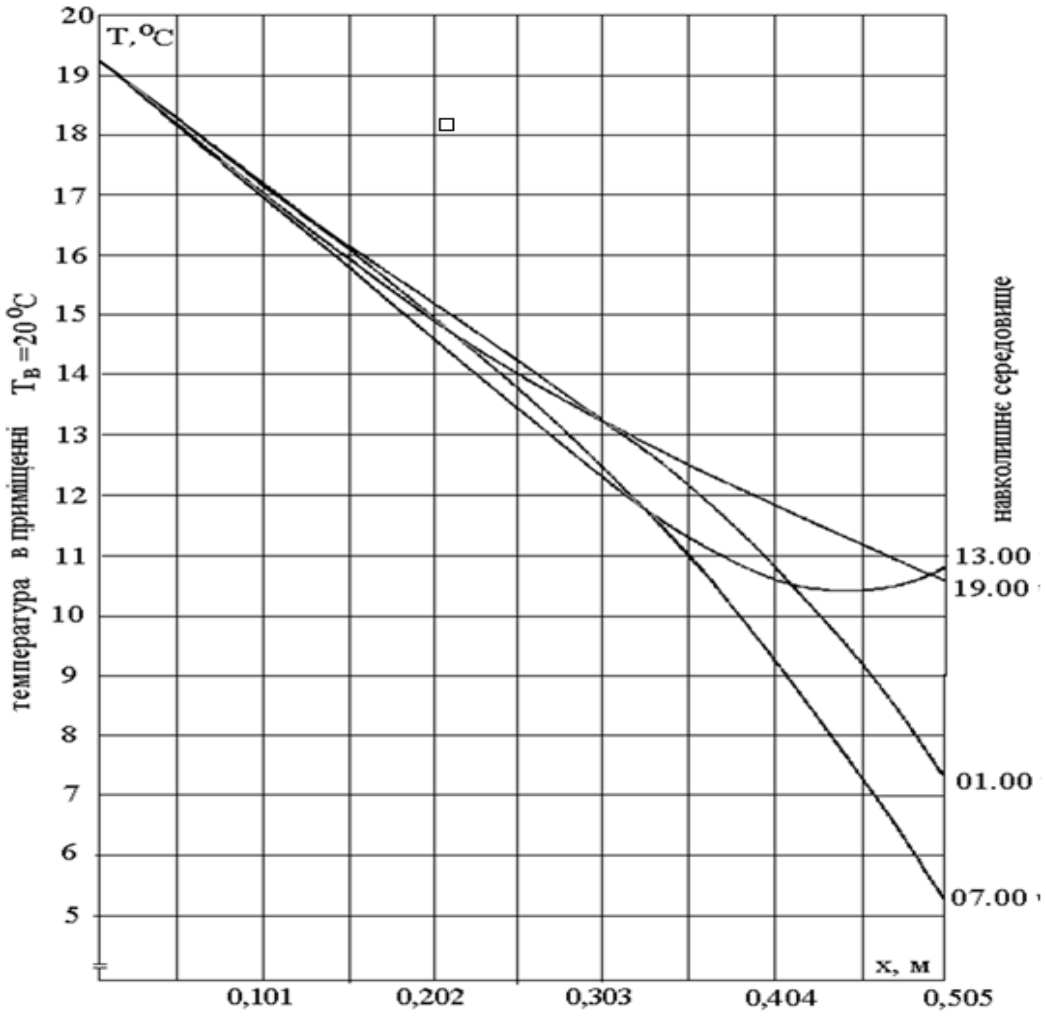

Рисунок 4.6 – Поле температуро в стіні

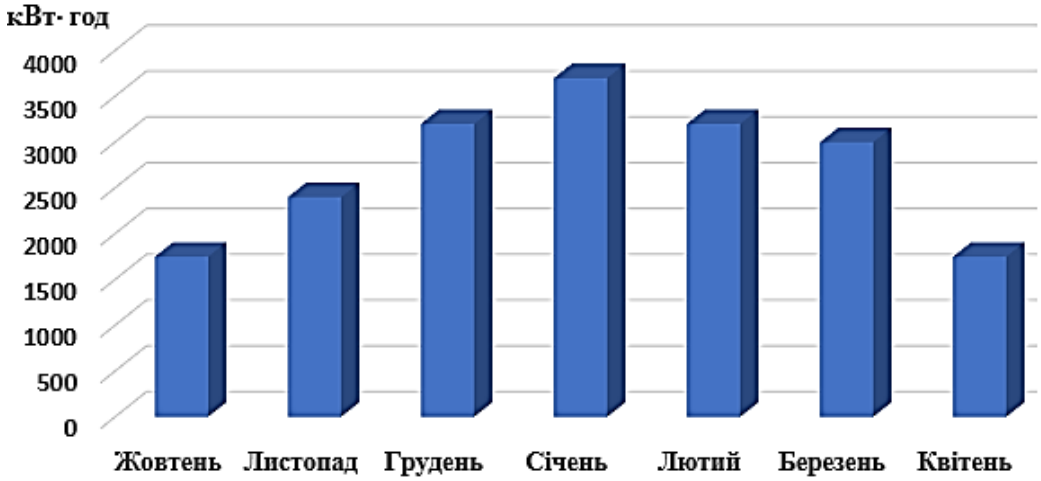

Рисунок 4.6 – Теплова потужність ДСТ

Аналіз зміни теплової продуктивності ДСТ для міста Одеси показує, що максимальне місячне теплове навантаження системи у січні. У грудні та лютому теплова потужність менше ніж у січні, у жовтні і квітні теплова потужність найменша.

Для децентралізованої системи тепловою потужність (рисунок 4.6), з використанням ТН на базі різнорідних ЗВДЕ: сонячних колекторів (СК), ґрунтових теплообмінників (ГТ) та гібридних засобів акумулювання теплоти, які відрізняються корисним кумулятивним ефектом енергозбереження, наведені кумулятивні діаграми, які містять результати розрахунків коефіцієнтів заміщення теплового навантаження ДСТ. Умовні позначення в цій діаграмі показують частку теплопродуктивності від: ТН з ГТ і ТА; ТН з СК і ТА; від дублера енергії.

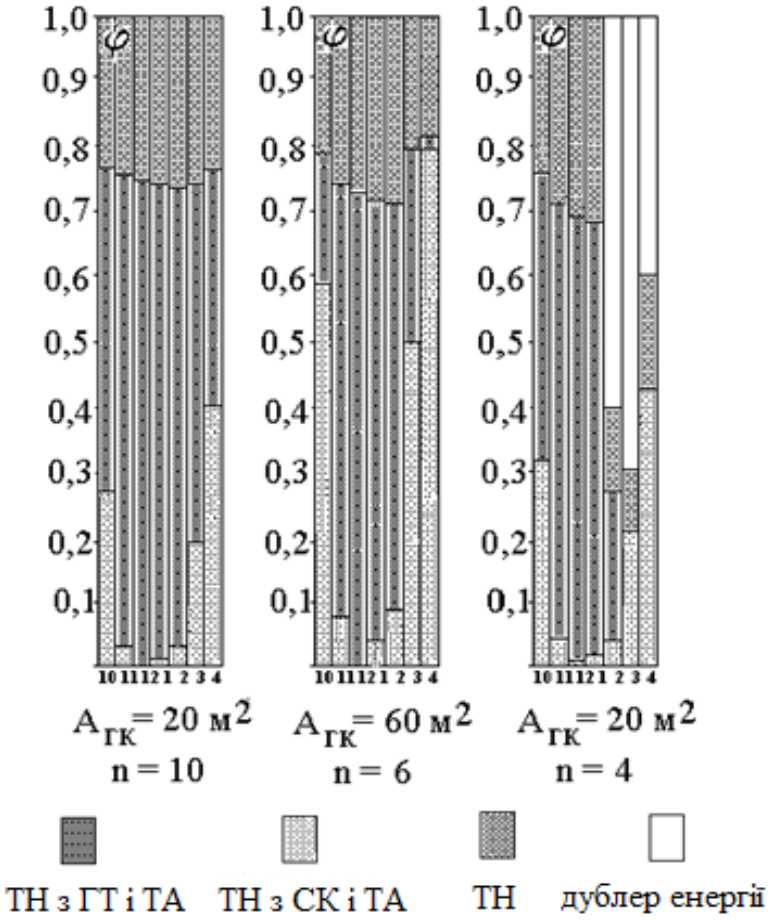

Рис. 4.7. Кумулятивні діаграми коефіцієнту заміщення при використанні ДСТ з ТН, СК, ГТ та БА

4.3. Висновки до розділу

1. В результаті чисельного теплова потужність ДСТ при використанні ТН з СК і БА та ГТ і БА. Порівняння ефективності ДСТ з використанням виконано по критерію заміщення φ теплового навантаження за рахунок ТН з різнорідними ЗВДЕ та гібридних засобів акумулювання теплоти.

2. Частка теплового навантаження за рахунок використання ТН з різнорідними ЗВДЕ становить 0,75…0,8. У відносно теплі місяці сезону перевагу має ТН з СК і БА, а в холодні місяці сезону опалення перевагу має ТН з ГТ і БА.

3. Гібридні засоби акумулювання теплоти, з урахуванням кумулятивного ефекту накопичення теплоти стінами будівлі, для чого не потрібні додаткові капітальні витрати сприяють зменшенню теплового навантаження та зменшення собівартості генерації теплоти децентралізованою системою

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

1. Для ефективного впровадження децентралізованої системи теплозабезпечення з теплонасосними генераторами теплоти, запропоновано використовувати різнорідні ЗВДЕ, які відрізняються здібністю до взаємної компенсації дефіциту одне одного, та створюють умови ефективного використання гібридних засобів накопичення теплоти. Для вирішення проблем енергозбереження необхідна розробка математичної моделі, на основі використання якої можна визначити раціональні умови функціонування децентралізованої системи теплозабезпечення з урахуванням регіональних можливостей і потреб.

2. Практична реалізація децентралізованих теплонасосних систем з використанням ЗВДЕ та засобів гібридного акумулювання теплоти, для одержання кумулятивного ефекту від застосування не тільки теплових акумуляторів, а також акумулювання теплоти стінами будівлі можна досягти енергозберігаючого ефекту.

Використання децентралізованих теплонасосних систем на базі ЗВДЕ та засобів гібридного акумулювання теплоти, як засобу енергозбереження дозволяє отримати виграш не тільки в енерговитратах, а також зменшує теплове забруднення навколишнього середовища.

В відомих публікаціях відсутні схемно-конструктивні пропозиції, децентралізованих теплонасосних систем з використанням ЗВДЕ та засобів гібридного акумулювання теплоти, математичні моделі, зрівняльний аналіз енергетичної ефективності схемних рішень та режимів роботи.

Використання теплонасосних систем з використанням ЗВДЕ та засобів гібридного акумулювання теплоти є раціональним шляхом до підвищення ефективності і надійності децентралізованого теплозабезпечення.

3. В результаті чисельного теплова потужність ДСТ при використанні ТН з СК і БА та ГТ і БА. Порівняння ефективності ДСТ з використанням виконано по критерію заміщення φ теплового навантаження за рахунок ТН з різнорідними ЗВДЕ та гібридних засобів акумулювання теплоти. Частка забезпечення теплового

навантаження за рахунок використання ТН з різнорідними ЗВДЕ становить 0,75…0,8. У відносно теплі місяці сезону опалення перевагу має ТН з СК і БА, а в холодні місяці сезону опалення перевагу має ТН з ГТ і БА.

Гібридні засоби акумулювання теплоти, з урахуванням можливості до кумулятивного ефекту накопичення теплоти стінами, для чого не витрачаються додаткові капітальні кошти, сприяють не тільки зменшенню теплового навантаження, а й зменшення собівартості генерації теплоти запропонованою децентралізованою системою.

4. В результаті чисельного теплова потужність ДСТ при гнучкому використані використанні ТН з двома контурами СК і БА та ГТ і БА зменшується, що встановлено на основі порівняння результатів чисельного моделювання ефективності ДСТ за критерієм заміщення φ теплового навантаження від застосування ТН з взаємно компенсуючими фізичними властивостями різнорідних ЗВДЕ та гібридних засобів акумулювання теплоти.

Частка забезпечення теплового навантаження за рахунок використання ТН з різнорідними ЗВДЕ становить 0,75…0,8. У відносно теплі місяці сезону опалення перевагу має ТН з СК і БА, а в холодні місяці сезону опалення перевагу має ТН з ГТ і БА.

Гібридні засоби акумулювання теплоти, з урахуванням кумулятивного ефекту накопичення теплоти стінами, на потребують додаткових капітальних внесків, що сприяє зменшенню теплового навантаження та зменшення собівартості генерації теплоти децентралізованою системою, відповідно.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Державна служба статистики Україні «Виробництво та розподіл валового внутрішнього продукту за видами економічної діяльності. Валова додана вартість». – Режим доступу: https://data.gov.ua/dataset/cf0f1189-141b-4492-a359-32b941384030]

2. Закон України про енергозбереження №74/94 від 1.07.1994 р. // Закони України. – Київ, 1997. – Т.7. – С. 281 – 291. — Режим доступу: https://zakononline.com.ua/documents/show/162782___595043

3. Закон України “Про пріоритетні напрями інноваційної діяльності в Україні // Закони України. – Київ, 2023. – Режим доступу https://mon.gov.ua/ua/news/prodovzheno-strok-diyi-prioritetnih-napryamiv-rozvitku-nauki-i-tehniki-ta-innovacijnoyi-diyalnosti-v-ukrayini

4. Відновлювані джерела енергії: видання друге, доповнене / За заг. ред. С. О. Кудрі. Київ: Інститут відновлюваної енергетики НАНУ, 2024. 492 с. – Режим доступу: https://www.ive.org.ua/wp-content/uploads/monograph2024.pdf

5. GDP (current US$). World Development Indicators. – Режим доступу: http://pmguinfo.dp.ua/mir/8055-rejting-20-najbilshikh-krajin-za-vvp-u-2024-rotsi

6. Стратегія низьковуглецевого розвитку України до 2050 року.– Режим доступу: https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2023/07/LEDS_ua_last.pdf

7. Morozyuk, A. Denysova, Saad Aldin Alhemiri Daowd Lila. Synthesize of the integrative trigeneration system for a «Solar House» in the Middle East region// Eastern-European Journal of Enterprise Technologies 2019 . – Vol. 1, N 8 (97). – C 43 –50. DOI: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.156129

8. Морозюк Л. І., Денисова А. Є., Саад Алдін Алхемірі Дауд Ліла, Хуссейн Джамал Таліб. Принцип створення системи тригенерації з сонячною енергоустановкою // Вісник Національного Технічного Університету «ХПІ». Серія: Інноваційні дослідження у наукових роботах студентів, 2020, № 5 (1359). – С. 11–18. – Режим доступу: http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/47696

9. Денисова А.Е., Амерханов Р.А., Ададуров Е.А. Анализ системы теплоснабжения с комплексным использованием альтернативных источников энергии // Известия вузов. Электромеханика.–2004. – №1. – С. 61 – 64.

10. A. Mazurenko, A. Denysova, G. Balasanian, A. Klymchuk, K. Borisenko. Improving the efficiency of operation mode heat pump hot water system with two-stage heat accumulation // Eastern-European journal of enterprise technologies, 1/8 (85), 2017. – p. 27–33. – Режим доступу: http://dspace.opu.ua/jspui/handle/123456789/5254, http://journals.uran.ua/eejet/article/view/92495

11. Комплексна геліоакумуляційна і теплонасосна система теплопостачання в комунально-побутовому секторі / А. Е. Денисова, Б. Х. Драганов, М. А. Сироватка, С. А. Герасимчук // Відновлювана енергетика. Комплексні енергетичні системи на основі НВДЕ. – 2012. – № 2. – С. 16 –18. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vien_2012_2_5

12. Denysova A.E., Mazurenko A.S., Denysova A.S. Efficiency of multi-module solar collectors as the prefix to the boiler // Journal of the Academy of Sciences of Moldova “Problemele energeticii regionale. Seria Termoenergetică”. – 2014. – 3(26).– P.53–59. – Режим доступу: https://ibn.idsi.md/sites/default/files/imag_file/Efficiency%20of%20multi%20module%20solar%20collectors%20as%20a%20prefix%20to%20a%20boiler.pdf

13. Denysova A.E., Mazurenko A.S., Denysova A.S. Thermal Efficiency of Power Module “Boiler with Solar Collectors as Additional Heat Source” For Combined Heat Supply System // Journal of the Academy of Sciences of Moldova “Problemele energeticii regionale. Seria Termoenergética”. – 2015.– 1 (27). P.44 – 50. – Режим доступу: https://journal.ie.asm.md/assets/files/04_01_27_2015.pdf

14. Denysova A., Nikulshin V., Wysochin V., Zhaivoron O. S., Solomentseva Y.V. Modelling the efficiency of power system with reserve capacity from variable renewable sources of energy // Herald of Advanced Information Technology. 2021, Vol. 4. – N 4. – P.318-328. – Режим доступу: https://doi.org/10.15276/hait.04.2021.3

15. Anatoly Andryushchenko, Vladimir Nikulshin, Alla Denysova. Comparative analysis of different energy sources for heating system in Ukraine // Agricultural

Research and Technology: Open Access Journal (ARTOAJ), N 13 (4), 2018. – P. 1 – 2. – Режим доступу: https://juniperpublishers.com/artoaj/pdf/ARTOAJ.MS.ID.555892.pdf

16. Аналіз ефективності використання енергоресурсів у розвинених зарубіжних країнах і залежність від їх імпорту. «НЕК Укренерго» Київ: 2018 – Режим доступу: https://ua.energy/wp-content/uploads/2018/01/1.-Efektyvnist_energ_resursiv.pdf

17. Результати рейтингу енергоефективності областей України. Київ, 2020. – Режим доступу: https://euea-energyagency.org/wp-content/uploads/2020/10/Panel_1_-_S1_MPashkevich.pdf

18. Європейське майбутнє України: довкілля, енергетика та повоєнна відбудова очима громадян. DiXi Group. – Режим доступу: https://dixigroup.org/analytic/yevropejske-majbutnye-ukrayiny-dovkillya

19. Маляренко В.А. Енергозбереження – пріоритетний напрямок розвитку і вдосконалення комунальної енергетики // Інтегровані технології і енергозбереження, 2006. – №3. – С. 19–29.

20. Маляренко В. А. Аналіз споживання паливно-енергетичних ресурсів України та їх раціонального використання / В. А. Маляренко, І. Є. Щербак // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків : НТУ «ХПІ», 2013. – Вип. 14. – С. 118–126. 378.

21. Мацевитый Ю. М. О рациональном использовании теплонасосных технологий в экономике Украины [Текст] / Ю. М. Мацевитый, Н. Б. Чиркин, Л. С. Богданович, А. С. Клепанда // Энергосбережение, энергетика, энергоаудит. – 2007. – № 3. – С. 3–11.

22. Грунь А.І. Сучасні методи проєктування систем тепло- і холодопостачання з використанням енергозберігаючого обладнання. Практична реалізація проєктів / А.І. Грунь, О.А. Климчук, С.Ю. Юрковський // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – 2012. – Вип. 8. – С. 150 – 153. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vcpient_2012_8_24

23. Зарубіжний досвід розвитку систем централізованого та автономного тепло- та електропостачання. – Режим доступу: https:// ua.energy/wp-content/uploads/2018/01/5.-TSentralizovane-ta-avtonomne-teplozabezpechennya.pdfhttps://ua.energy/wp-content/uploads/2018/01/5.-TSentralizovane-ta-avtonomne-teplozabezpechennya.pdf

24. Карп І.М., Нікітін Є.Є., П'яних К.Є, Сігал О.І, Дубовськіий С.В., Гелетуха Г.Г. та інші. Стан та шляхи розвитку систем централізованого теплопостачання в Україні: Наукове видання у двох книгах. Книга 1. – Київ: НВП «Наукова думка» НАН України, 2021. – 264 с. – Режим доступу: https://uabio.org/wp-content/uploads/2023/02/Stan_ta_shlyakhy_rozvytku_tsentralizovanoho_teplopostachannya.pdf

25. Osama A. Marzouk. Summary of the 2023 (1st edition) Report of TCEP (Tracking Clean Energy Progress) by the International Energy Agency (IEA), and Proposed Process for Computing a Single Aggregate Rating // E3S Web of Conferences 601, 00048 (2025). – Режим доступу: https://doi.org/10.1051/e3sconf/202560100048

26. Denysova A.E., Mazurenko A.S., Denysova A.S. Efficiency Growth of Interaction of Combined cycle Cogeneration Plant with the Heat Supply System // Problemele energeticii regionale termoenergetică. 2015. – N 2(28). – P.89 – 95. 2http://journal.ie.asm.md/assets/files/11_02_28_2015.pdf

27. Денисова А.Є., Жайворон О.С. Підвищення ефективності теплонасосної утилізації циркуляційної води електростанцій// Вісник Національного Технічного Університету «ХПІ». Серія: Інноваційні дослідження у наукових роботах студентів, 2023, № 1 (1365). С. 1–10. – Режим доступу: https://doi.org/10.20998/2220-4784.2023.01.01.

28. Мацевитый Ю. М., Чиркин Н. Б., Богданович Л. С., Клепанда А. С. О рациональном использовании теплонасосных технологий в экономике Украины // Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит. 2007, №3.– С.20 – 32.

29. Bertoldi Paolo. Energy Consumption and Energy Efficiency trends in the EU-28 2000-2018 // JRC Publications Repository, 2020. – Режим доступу: https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC120681

30. Котли для спалювання твердого біопалива – Режим доступу: http://www.termowood.ru/steam-boilers.html

31. Matsson J.E. An Introduction to ANSYS Fluent 2022 // SDC Publications, 2022. – 552 p. – Режим доступу: https://books.google.com.ua/books?id=6yf3DwAAQBAJ&printsec=copyright&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false

32. RETScreen Plus Expert "Renewable Energy Project Analysis Software, Energy Model and Solar Resource and Heating Load Calculation".– Режим доступу: https://www.edx.org/learn/business-administration/hec-montreal-energy-management-powered-by-retscreen

33. Recknagel H., Sprenger E., Hönmann W., Schramek E.-R. Ogrzewanie i klimatyzacja: poradnik: z uwzględnieniem chłodnictwa i zaopatrzenia w ciepłą wodę. Arkady, Warszawa 1976 (tłum. Wydania niemieckiego z 1972), Wydawnictwo EWFE 1994, Wydawnictwo Omni-Scala, Wrocław 2008. – 2068 p.

34. Matsson J.E. An Introduction to SolidWorks Flow Simulation 2023 // SDC Publications, 2023. – 390 p. – Режим доступу: https://books.google.com.ua/books?id=6yf3DwAAQBAJ&printsec=copyright&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false

35. Денисова А.Е., Котов П.О., Бірюк В.Ю. Можливість застосування інтегрованих теплонасосних систем на електростанціях // Холодильна техніка і технологія, 2011. – № 2 (130). – С. 51 –54.

36. Sit M.L., Juravleov A.A., Frid S.E., Timchenko D.V., Denysova A.E., Uzun M. Control of Carbon Dioxide Bivalent Heat Pump on Heating of Buildings. Part II // Journal of the Academy of Sciences of Moldova “Problemele energeticii regionale. Seria Termoenergética”. 4 (64) 2024. – P. 150–161 https://doi.org/10.52254/1857-0070.2024.4-64.13

37. Denysova A.A., Ivanov P., Mazurenko A.S., Zhaivoron O.S. Perfection of an Energy-Economic and Environmental Parameters of the Ground Source Heat Pump Systems with Preventing Freezing of the Soil around Ground Pipes// Problemele

energeticii regionale 2(62) 2024. –P. 108 -120. DOI: https://doi.org/10.52254/1857-0070.2024.2-62.10

38. Денисова А.Є., Бірюк В.Ю. Аналіз парокомпресійного циклу теплонасосних станцій теплопостачання// Пр. Одес. політехн. ун-та., 2012. – Вып.1 (38). – С. 125–128.

39. Денисова А.Є., Бірюк В.Ю. Використання теплонасосних технологій на електростанціях для централізованого теплопостачання// Холодильна техніка і технологія, 2012. – №1. – С.39 – 41.

40. G. Luzhanska, M. Galatsan, M. Serheiev, S. Gryshchenko, P. Kandieiev. Research of heat generation and consumption modes in combined heat supply systems using alternative energy sources. // Proceedings of Odessa Polytechnic University, Issue 1(65), 2022. – P. 40–49.– Режим доступу: DOI: https://doi.org/10.15276/opu.1.69.2024.05
https://pratsi.op.edu.ua/index.php/pratsi/article/view/445/444

41. Рєпін Ю., Грищенко С., Климчук Н., Сергеєв М., Ткачов, О. (2024). Ефективність роботи теплових насосів із відбором теплоти від ґрунту та зовнішнього повітря в житлових будинках // Refrigeration Engineering and Technology, 60(2). – С. 122–120. – Режим доступу: https://doi.org/10.15673/ret.v60i2.2951

42. O. Klymchuk, G. Luzhanska, G. Balasanian, M. Serheiev, I. Aksyonova. Application of CAD technologies for research of heat exchange units of microclimate systems based on alternative energy sources. (2022) // Proceedings of the Odesa Polytechnic University, Issue 1(65), 2022, 47–55. – Режим доступу: DOI: https://doi.org/10.15276/opu.1.65.2022.05

43. Лужанська Г.В., Бабаєв Є.С., Сергеєв М.І., Паламарчук О.О., Фуркаленко О.Л. (2024). Підвищення ефективності роботи автономних систем теплопостачання для індивідуального опалення з застосуванням теплових насосів // Refrigeration Engineering and Technology, 60 (3). С. 197–204. – Режим доступу: DOI https://doi.org/10.15673/ret.v60i3.3000

44. A.E Denysova, M.I. Serheiev (2025). The toolkit for rising the efficiency of heat pump heating system using the accumulation of heat by walls of the building // Refrigeration Engineering and Technology, Issue 60(4). – Режим доступу: DOI https://doi.org/10.15673/ret.v61i1.3095

45. Височин В.В., Нікульшин В.Р., Денисова А.Є., Бударін В.О. Узгоджені параметри сезонних акумуляторів теплоти для геліосистеми // Вісник національного технічного університету «ХПІ»“ХПІ”, N 5, (1359), 2020. С. 31–36. – Режим доступу: http://idnrs.khpi.edu.ua/article/view/2220-4784.2020.05.05

46. Височин В.В., Нікульшин В.Р., Денисова А.Є., Белоусова Н.Г. Ефективність ґрунтових акумуляторів геліосистем //Вісник Національного технічного університету “ХПІ”, N 21, (1346), 2019. С. 3–9. Doi: 10.20998/2220-4784.2019.21.01 – Режим доступу: http://repository.kpi.kharkov.ua/bitstream/KhPIPress/42677/1/vestnik_KhPI_2019_21_Vysochin_Effektivnost.pdf

47. Denysova A. E., Ivanov P.A. Modelling of thermal processes in vertical heat exchangers of ground-source heat pump / Herald of Advanced Information Technology 2023; Vol.6 No.4: 352–362. Режим доступу: DOI: https://doi.org/10.15276/hait.06.2023.23

48. Denysova A. E., Antoshchuk S.G., Ivanov P. O., Arsirii O. O., Troynina A.S. Modelling of the temperature field in the soil massive for different work modes the ground source heat pump. Applied Aspects of Information Technology 2024;Vol.7 No.3:242-254. DOI: https://doi.org/10.15276/aait.07.2024.17

49. Денисова А.Є., Іванов П.О. Математичне моделювання нестаціонарних теплових процесів в ґрунтовій теплонасосній системі// Вісник Національного Технічного Університету «ХПІ». Серія: Інноваційні дослідження у наукових роботах студентів, 2023, No 2 (1366). С. 11– 17. –Режим доступу: https://doi.org/10.20998/2220-4784.2023.02.02

50. A. Denysova, O. Zhaivoron. Modelling the efficiency of the combined heat pump system with tank accumulator for permanent and intermittent heating modes of the public buildings // Proceedings of Odessa Polytechnic University, Issue 1(67), 2023. –

Р. 35 – 48. DOI: 10.15276/opu.1.67.2023.05. – Режим доступу: https://pratsi.op.edu.ua/articles/show/24312

51. Serheiev M. I. Heat pump system using the subsoil and waste waters energy// Proceedings of 13 International Scientific Conference in Spain Science and society: tools of modern innovative development". May 06…09, 2025. – Режим доступу: https://isg-konf.com/science-and-society-tools-of-modern-innovative-development/

52. Пат. 48720 А Україна, МКІ F 24 J 3/00, Сонячний колектор: Пат. 48720 А Україна, МКІ F24J3/00 / Денисова А.Є., Мазуренко А.С., Аль Уста Айман (Україна).–№ 2001117908; Заявл. 20.11.2001; Опубл.15.08.2002, Бюл. № 8. – 3 с.

53. Сергеєв М. І. Доцільність застосування теплонасосних установок на основі інструментарію визначення еколого-енергетичних показників // XXXIII International Scientific and Practical Conference "Information Technologies: Science, Engineering, Technology, Education, Health" (MicroCAD-2025), May 14-17, 2025. – Режим доступу: https://web.kpi.kharkov.ua/microcad/wp-content/uploads/sites/240/2025/05/Programka-2025.pdf

54. Martinopoulos G., Kikidou V., Bozis D. Energy assessment of building physics principles in secondary education buildings. *Energies.* 2018. 11(11). P. 2929.

55. Kikidou V. Energy assessment of building physics principles in secondary education buildings. 2017. https://repository.ihu.edu.gr/xmlui/handle/11544/29176

56. Air Conditioners, Liquid Chilling Packages and Heat Pumps, with Electrically Driven Compressors, for Space Heating and Cooling. EN 14825. Testing and Rating at Part. Load Conditions and Calculation of Seasonal Performance. European Committee for Standardization (CEN). Brussels, Belgium, 2018. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.02.040

57. Blarke M. B. Towards an intermittency-friendly energy system: Comparing electric boilers and heat pumps in distributed cogeneration. *Applied Energy*. 2012. 91(1). 349–365. DOI: 10.1016/j.apenergy.2011.09.038.

58. Conti P., Bartoli C., Franco A., Testi D. Experimental analysis of an air heat pump for heating service using a hardware-in-the loop system. *Energies.* 2020. 13. 4498. DOI: 10.3390/en13174498.

59. Schito E., Conti P., Urbanucci L., Testi D. Multi-objective optimization of HVAC control in museum environment for artwork preservation, visitors' thermal comfort and energy efficiency. *Build. Environ*. 2020. 180. 107018.

60. Saltelli A., Ratto M., Andres T., Campolongo F., Cariboni J., Gatelli D., Saisana M., Tarantola S. Global Sensitivity Analysis. The Prime, Editor Willey.GB, 2008, 305 p. http://www.andreasaltelli.eu/file/repository/A_Saltelli_Marco_Ratto_Terry_Andres_Francesca_CampolongoJessica_Cariboni_Debora_Gatelli_Michaela_Saisana_Stefano_Tarantola_Global_Sensitivity_Analysis_The_Primer_Wiley_Interscience_2008_.pdf

61. D. Patteeuw, G. Reynders, K. Bruninx, C. Protopapadaki, E. Delarue, D. William, D. Saelens, and L. Helsen. CO_2-abatement cost of residential heat pumps with Active Demand Response : demand- and supply-side effects. Applied Energy, (May), 2015.

62. Mathiesen B.V., Lund H., Karlsson K. 100% Renewable energy systems, climate mitigation and economic growth. *Appl. Energy.* 2011. 88. 488–501.

63. Franco A., Salza, P. Strategies for optimal penetration of intermittent renewables in complex energy systems based on techno-operational objectives. *Renew. Energy.* 2011. 36. 743–753.

64. Xia L, Ma Z.J., McLauchlan C., Wang S. Experimental investigation and control optimization of a ground source heat pump system. Applied Thermal Engineering, 2017, vol. 127, pp. 70-80.

65. E. Zanchini, S. Lazzari and A. Priarone. Effects of flow direction and thermal short-circuiting on the performance of coaxial ground heat exchangers//Renewable Energies and Power Quality, 2009. vol. 1, no.7, pp. 668-675. Available at: doi:10.24084/repqj07.469

66. Malyshev A. A., Kireev V. S. Exergy analysis of a heat pump // Scientific journal ITMO. Series: Refrigeration and air conditioning, 2017, no 4 (27). pp. 22–30.

67. Yang W, Sun L, Chen Y. Experimental investigations of the performance of a solar-ground source heat pump system operated in heating modes // Energy and Buildings, 2015, Vol. 89,P. 97–111. Available at: doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.08.006.

68. Sarbu I, Sebarchievici C. General review of ground-source heat pump systems for heating and cooling of buildings. Energy and Buildings, 2014, vol. 70, pp.441–454. Available at: doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.11.068

69. Hao Fang, Jianjun Xia, Kan Zhu, Yingbo Su, Yi Jiang. Industrial waste heat utilization for low temperature district heating. Energy Policy, 2013, vol.62, pp. 236 – 246. Available at: doi:10.1016/j.enpol.2013.06.104.

70. Stuart J.S., Bale V.R., Marc A.R. Geothermal heat pump systems: Status review and comparison with other heating options. Applied Energy, 2013, vol. 101, pp.341–348. – doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.01.048.

71. Bayer P., Saner D., Belay S., Rybach L., Blum P. Greenhouse gas emission savings of ground source heat pump systems in Europe: A review. Renewable Sustainable Energy Reviews, 2012, vol.16, pp.1256-1267. – Available at: doi.org/10.1016/j.rser.2011.09.027

72. Ruiz-Calvo F., Cervera-Vázquez J., Montagud C., Corberán J.M. Reference data sets for validating and analyzing GSHP system based on an eleven-year operation period. Geothermics, 2016, vol. 64, pp. 538–550.

73. Qian H., Wang Y. Modeling the interactions between the performance of ground source heat pumps and soil temperature variations. Energy for Sustainable Development, 2014, vol. 23, pp.115-121. – Available at: doi.org/10.1016/j.esd.2014.08.004.

74. Alberto Liuzzo-Scorpo, Bo Nordell, Signhild Gehlin. Influence of regional groundwater flow on ground temperature around heat extraction boreholes, 2015, vol. 56, pp. 119-127. – Available at: doi.org/10.1016/j.geothermics.2015.04.002.

75. Hu P.F., Hu Q.S., Lin Y.L., Yang W., Xing L. Energy and exergy analysis of a ground source heat pump system for a public building in Wuhan, China under different control strategies. Energy and Buildings, 2017, vol.152, pp.301-312. – Available at: doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.07.058

76. Rad F.M., Fung A.S., Leong W.H. Feasibility of combined solar thermal and ground source heat pump systems in cold climate, Canada. Energy and Buildings, 2013, vol.61, pp. 224-232. – Available at: doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.02.036.

77. Nguyen H.V., Law Y.L.E., Alavy M., Walsh P.R., Leong W.H., Dworkin S.B. An analysis of the factors affecting hybrid ground-source heat pump installation potential in North America. Applied Energy, 2014, vol.125, pp. 28-38. – Available at: doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.03.044.

78. Zhijian Liu,Wei Xu, Cheng Qian, Xi Chen, Guangya Jin. Investigation on the feasibility and performance of ground source heat pump (GSHP) in three cities in cold climate zone, China, 2015, vol. 84, pp. 89-96. doi.org/10.1016/j.renene.2015.06.019.

79. Wenxin Li, Xiangdong Li, Yong Wan, Jiyuan Tu. An integrated predictive model of the long-term performance of ground source heat pump (GSHP) systems. Energy and Buildings, 2018, vol.159, pp.309–318. – Available at: doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.11.012

80. Lund P.D., Lindgren J., Mikkola J., Salpakari J. Review of energy system flexibility measures to enable high levels of variable renewable electricity. Renew. Sustain. Energy Rev. 2015. 45. 785–807.

81. Reynders G., Lopes R.A., Marszal-Pomianowska A., Aelenei D., Martins J., Saelens D. Energy flexible buildings: An evaluation of definitions and quantification methodologies applied to thermal storage. Energy Build. 2018. 166. 372–390.

82. Samuels J.A., Grobbelaar S.S., Booysen M.J. Light-years apart: Energy usage by schools across the South African affluence divide. Energy Res Soc Sci. 2020. 70. 101692.

83. Geraldi M.S., Ghisi E. Mapping the energy usage in Brazilian public schools. Energy Build. 2020. 224. 110209.

82. Delucchi, M. A. & Jacobson, M. Z. Providing all global energy with wind, water and solar power. Part II: Reliability, system and transmission costs, and policies. *Energy Policy.* 2011; 39(3): 1170–1190. – Available at: https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.11.045.

83. Papadimitriou C. H. & Steiglitz K. Combinatorial optimization: Algorithms and complexity. Prentice-Hall, Englewood Cliffs. NJ: USA. 1982. – Available at: https://lib.ugent.be/catalog/rug01:000825070.

84. Гончаров О. А. Чисельні методи розв’язання прикладних задач: навч. посіб. / О. А. Гончаров, Л. В. Васильєва, А. М. Юнда. – Суми : Сумський державний університет, 2020. – 142 с.

85. Чисельні методи в прикладній фізиці : навч. посіб. / В. О. Катрич, Д. В. Майборода, С. О. Погарський, С. Л. Просвірнін. – Харків : Харківський нац. ун-т ім. В. Н. Каразіна, 2011. – 172 с.

ДОДАТОК А

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

1. G. Luzhanska, M. Galatsan, M. Serheiev, S. Gryshchenko, P. Kandieiev. Research of heat generation and consumption modes in combined heat supply systems using alternative energy sources. // Proceedings of Odessa Polytechnic University, Issue 1(65), 2022. – P. 40–49.– Режим доступу: DOI: https://doi.org/10.15276/opu.1.69.2024.05 https://pratsi.op.edu.ua/index.php/pratsi/article/view/445/444

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

2. Рєпін Ю., Грищенко С., Климчук Н., Сергеєв М., Ткачов, О. (2024). Ефективність роботи теплових насосів із відбором теплоти від ґрунту та зовнішнього повітря в житлових будинках // Refrigeration Engineering and Technology, 60(2). – С. 122–120. – Режим доступу: https://doi.org/10.15673/ret.v60i2.2951

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

3. O. Klymchuk, G. Luzhanska, G. Balasanian, M. Serheiev, I. Aksyonova. Application of CAD technologies for research of heat exchange units of microclimate systems based on alternative energy sources. (2022) // Proceedings of the Odesa Polytechnic University, Issue 1(65), 2022, 47–55. – Режим доступу: DOI: https://doi.org/10.15276/opu.1.65.2022.05

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

4. Лужанська Г.В., Бабаєв Є.С., Сергеєв М.І., Паламарчук О.О., Фуркаленко О.Л. (2024). Підвищення ефективності роботи автономних систем теплопостачання для індивідуального опалення з застосуванням теплових насосів // Refrigeration Engineering and Technology, 60 (3). С. 197–204. – Режим доступу: DOI https://doi.org/10.15673/ret.v60i3.3000

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

5. A.E Denysova, M.I. Serheiev (2025). The toolkit for rising the efficiency of heat pump heating system using the accumulation of heat by walls of the building // Refrigeration Engineering and Technology, Issue 60(4). – Режим доступу: DOI https://doi.org/10.15673/ret.v61i1.3095

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

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

6. Лужанська Г.В., Сергеєв М.І., Чумаченко А.М., Климчук І.О., Михайленко М.С. Потенціал сонячної енергетики в Україні // Proceedings of the XXIII International Scientific and Practical Conference “World ways and methods of improving outdated theories and trends”. Zagreb, Croatia June 11 – 14, 2024. С. 368–371. – Режим доступу: https://isg-konf.com/world-ways-and-methods-of-improving-outdated-theories-and-trends/

7. Лужанська Г.В., Бабаєв Є.С., Сергеєв М.І., Позднякова Г.І. Климчук І.О. Аналіз сучасного стану енергопостачання для комунальної енергетики в загальному енергетичному балансі країни // Proceedings of the 9th International Scientific and Practical Conference “Theory and practice of science: key aspects”. Rome, Italy, February 19-20, 2024. P. 496–502. – Режим доступу: DOI: https://doi.org/10.51582/interconf.19-20.02.2024
https://archive.interconf.center/index.php/2709-4685/issue/view/19-20.02.2024/199

8. Климчук О.А., Андрющенко А.М., Бабаєв Є.С., Сергеєв М.І. Переведення теплопостачання районів міст на електроенергію з використанням існуючих теплових мереж // Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Енергоефективне місто. XXI століття». Секція; Енергоефективні інженерні системи міст. Одеса, ОДАБА, 10–11 листопада 2022. – С. 74 – 76. –
– Режим доступу:
https://odaba.edu.ua/upload/files/Zbirnik_Energoefektivne_misto_2022_1.pdf

9. Климчук О. А., Бабаєв Є. С., Сергеєв М. І. Підвищення ефективності використання теплових насосі в у комбінованих системах теплопостачання при змінних режимах експлуатації будівель, С. 24 //Збірка наукових праць XI Наукової конференції “Наукові підсумки 2022 року. Харків, Х.: Технологічний

центр, 2022. – 81 с. – Режим доступу: https://entc.com.ua/uk/konferentsii/610-naukovi-pidsumky-roku

10. Serheiev M. I. Heat pump system using the subsoil and waste waters energy // XIII International Scientific Conference in Spain “Science and society: tools of modern innovative development? May 06-09, 2025. – Режим доступу: https://isg-konf.com/science-and-society-tools-of-modern-innovative-development/

11. Сергеєв М. І. Доцільність застосування теплонасосних установок на основі інструментарію визначення еколого-енергетичних показників // XXXIII International Scientific and Practical Conference “Information Technologies: Science, Engineering, Technology, Education, Health” (MicroCAD-2025), May 14-17, 2025. – Режим доступу: https://web.kpi.kharkov.ua/microcad/wp-content/uploads/sites/240/2025/05/Programka-2025.pdf

ДОДАТОК Б
ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ АКУМУЛЮВАННЯ ТЕПЛОТИ ПРИ ВИКОРИСТАННІ СОНЯЧНИХ КОЛЕКТОРІВ З ЕКРАНОВАНИМИ ПОВЕРХНЯМИ В СХЕМІ ПОПЕРЕДНЬОГО ПІДІГРІВУ ВОДИ КОТЛА

Розглянемо ефективність використання екрану між абсорбером та теплоізоляцією сонячного колектора (СК) (рисунок В.1) [52]:

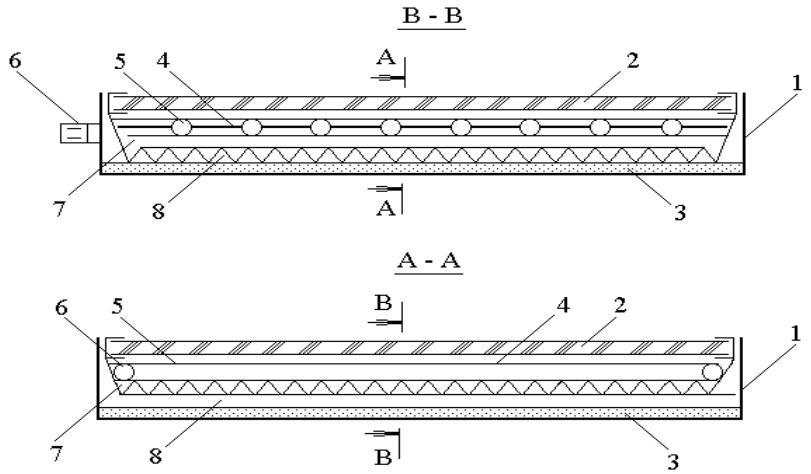

Рисунок Б.1 – Сонячний колектор, що працює як теплообмінник для попереднього підігріву води для котла, який є засобом гібридного акумулювання теплоти

У повітряному зазорі між абсорбером 4 і ізоляцією теплової 3 встановлюються екрани 7 та 8, які виконані з матеріалу з низьким коефіцієнтом поглинання. Профілі обох екранів СК виконують у вигляді гофр 8, які встановлюють на деякій відстані між собою. Напрямок гофр у першого екрана перпендикулярний напрямку труб СК для зменшення теплопередачі конвекцією. Напрямок гофр двох екранів взаємно перпендикулярний, що дозволяє зменшити втрати теплоти, бо втрати теплоти випромінюванням зменшуються через те, що основну частину випромінювання сприймає екран 7. В результаті цього знижується температура внутрішньої поверхні теплоізоляції і зростає в декілька разів термічний опір, а втрати теплоти в довкілля знижуються вдвічі, відповідно.

На відміну від відомих типів СК нами використано конструкцію СК як засіб акумулювання тебплоти (рисунок Б.1), що має високі енергетичні показники та придатна для роботи для умов примусової циркуляції, що характерно для комбінованих установок [52]. Цей тип СК прийнято нами за основу з метою вивчення енергетичних характеристик системи у радіаційно-кліматичних умовах регіонів України та Південно-Східної частини Європи.

Густина теплового потоку від поглинача до ізоляції дорівнює

$$q = q_к + q_л ,$$

де $q_к = \alpha_к(T_c - T_i)$ – густина конвективної складової частини теплового потоку;

$\alpha_к$ – коефіцієнт тепловіддачі, що враховує конвективну складову частину теплового потоку;

T_c , $T_{із}$ – температура поглинача і теплоізоляції, відповідно;

$q_л = \varepsilon_п \cdot c_o \cdot [(T_c/100)^4 - (T_i/100)^4]$ – густина радіаційної складової теплового потоку;

$\varepsilon_п = 1/[(1/\varepsilon_c) - (1/\varepsilon_{із}) - 1]$ – приведений степінь чорноти;

ε_c , $\varepsilon_{із}$ – степінь чорноти поглинача та теплової ізоляції, відповідно;

$c_o = 5{,}77$ Вт/(м^2·К^4) – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла

Для зручності аналізу запишемо вираз для $q_л$ в більш зручному вигляді:

$$q_л = \alpha_л(T_c - T_{із}),$$

де $\alpha_л$ – коефіцієнт тепловіддачі, що враховує радіаційну складову теплового потоку від поглинача до теплової ізоляції СК;

$$\alpha_л = \varepsilon_п \cdot c_o \cdot [(T_c/100)^4 - (T_{із}/100)^4]/(T_c - T_{із}) .$$

Приймаємо $T_c = 333$ К; $T_{із} = 313$ К; $\varepsilon_c \approx \varepsilon_{із} \approx 0{,}9$.

Тоді $\varepsilon_п = 1/[(1/0{,}9) - (1/0{,}9) - 1] = 0{,}82$

та $\alpha_л = 0{,}82 \cdot 5{,}77 \cdot [(333/100)^4 - (313/100)^4]/(333 - 313) = 6{,}4$ Вт/(м^2·К).

Звичайно, в умовах повітряного зазору коефіцієнт конвективної тепловіддачі $\alpha_к = 5$ Вт/(м^2·К), тобто в даному випадку СК без проміжного екрану $\alpha_л > \alpha_к$. При використані проміжного екранування, наприклад, з полірованого алюмінію між

абсорбером та тепловою ізоляцією СК, ступень чорноти якого $\varepsilon_{екр} = 0,05$, то приведений ступень чорноти складає:

$$\varepsilon_п^{екр} = 1/[(1/\varepsilon_c) - (1/\varepsilon_{екр}) - 1] = 1/[(1/0,9) - (1/0,05) - 1] = 0,05,$$

а коефіцієнт тепловіддачі радіацією буде:

$$\alpha_л^{екр} = 0,05 \cdot 5,77 \cdot [(333/100)^4 - (313/100)^4]/(333 - 313) = 0,39 \quad Вт/(м^2 \cdot К).$$

Таким чином, при використані проміжного екранування в конструкції СК $\alpha_л^{екр} << \alpha_к$, тобто в даному випадку густиною радіаційної частини теплового потоку можна знехтувати. Ефективність використання двох та більшої кількості екранів значно менше, бо основну кількість радіаційного теплового потоку відбиває перший екран.

Густина теплового потоку від зовнішньої поверхні теплової ізоляції для двох схем СК без екранування (рисунок Б.2, а) та з екрануванням (рисунок Б.2, б) визначається за наступним алгоритмом:

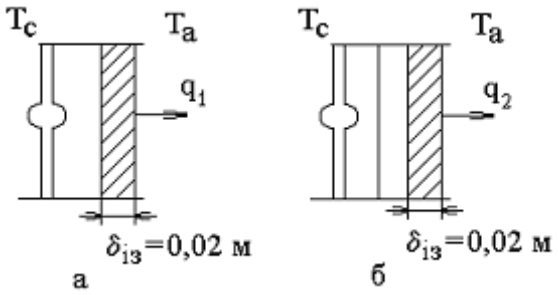

Рисунок Б.2 – Розрахункова схема сонячного колектора, що працює як теплообмінник для попереднього підігріву води для котла:
а – без екранування
б – з екрануванням

– термічний опір для СК без екранування (рис. 5.2, а) дорівнює:

$$R_1 = R_{заз} + R_i,$$

де $R_{заз}$, R_i – термічний опір повітряного зазору та теплоізоляції;

$R_{із} = \delta_{із}/\lambda_{із}$ – термічний опір теплоізоляції товщиною δ_i при коефіцієнті теплопровідності λ_i.

При цьому $1/R_{заз} = 1/R + 1/R_л$, де $R = 1/\alpha_к + 1/\alpha_к = 2/\alpha_к$ – термічний опір конвективної складової теплообміну між абсорбером і тепловою ізоляцією СК.

$R_л = 1/\alpha_л$ – термічний опір радіаційної складової теплообміну між абсорбером і тепловою ізоляцією СК.

З урахуванням розрахованих значень коефіцієнтів тепловіддачі $\alpha_л$ та α, одержимо наступні результати:

$R_л = 1/6,4 = 0,156$ (м^2·К)/Вт; $R=2/5=0,4$ (м^2·К)/Вт; $R_{із}=0,02/0,052=0,4$ (м^2·К)/Вт.

$R_{заз}= 0,4 \cdot 0,156 / (0,4 + 0,156) = 0,11$ (м^2·К)/Вт; $R_1= 0,11 + 0,4 = 0,51$ (м^2·К)/Вт.

– термічний опір для СК з екраном (рис. 5.2, б) дорівнює $R_2=2R + R_{із}$, де густиною радіаційного потоку знехтуємо, внаслідок того, що $\alpha_л^{екр} << \alpha$. Тоді, користуючись вище знайденими величинами значення $\alpha_л$ та $\alpha_к$, одержимо $R_2 = 2\cdot0,4 + 0,4 = 1,2$ (м^2·К)/Вт.

З зовнішньої сторони теплоізоляції при наявності вітру $\alpha_н \approx 20$ Вт/(м^2·К) термічний опір СК дорівнює $R_н=1/\alpha_н=1/20=0,05$ (м^2·К)/Вт, тоді густина теплового потоку для схеми СК без екранування дорівнює:

$$q_1 = (T_c - T_a)/(R_1+R_н) = (60 - 15)/(0,51+0,05) = 80 \text{ Вт/(м}^2\text{·К)}$$

та для СК з екрануванням становить:

$$q_2 = (T_c - T_a)/(R_1+R_н) = (60 - 15)/(1,2+0,05) = 36 \text{ Вт/(м}^2\text{·К)}$$

Висновок: Оскільки $q_1 >> q_2$, схема екрануванням СК за енергоефективність в 2,2 рази краще.

ДОДАТОК В
ПРОГРАМИ РОЗРАХУНКУ
В.1. РАДІАЦІЙНО-КЛІМАТИЧНИХ УМОВ РЕГІОНІВ
НА ОСНОВІ ДОБОВИХ ДАНИХ

```
program sun ‘на алгоритмічній мові Turbo Pascal;
uses crt;
 label 1,2,3;
 const
  mn=0.25;pi=3.1415927;
 var
  fi,delta,s,gamma,w,ctet,tet,tetz,cws,Td: real;
  n,m,month,day,hr,min: integer;
begin
clrscr;
write(Введіть географічну широту регіону');
readln(fi);
writeln(' Введіть час: ');
write('  годин: ');
readln(hr);
hr:=60*hr;
write('хвилин: ');
readln(min);
min:=hr+min;
w:=(720-min)/4;
writeln('січень   (1)');writeln('лютий  (2)');writeln('березень     (3)');
writeln('квітень   (4)');writeln('травень     (5)');writeln('червень     (6)');
writeln('липень     (7)');writeln('серпень   (8)');writeln('вересень (9)');
writeln('жовтень (10)');writeln('листопад (11)');writeln('грудень(12)');
writeln;
write('Введіть місяць року');
read(month);
if month=1 then m:=0 else
 if month=2 then m:=31 else
  if month=3 then m:=31+28 else
   if month=4 then m:=31+28+31 else
    if month=5 then m:=31+28+31+30 else
     if month=6 then m:=31+28+31+30+31 else
```

```
    if month=7 then m:=31+28+31+30+31+30 else
     if month=8 then m:=31+28+31+30+31+30+31 else
      if month=9 then m:=31+28+31+30+31+30+31+31 else
       if month=10 then m:=31+28+31+30+31+30+31+31+30 else
        if month=11 then m:=31+28+31+30+31+30+31+31+30+31 else
         if month=12 then m:=31+28+31+30+31+30+31+31+30+31+30 else
writeln;
write('Введіть число місяця');
read(day);
n:=m+day;
write('Ведіть кут нахилу СК ');
readln(s);
if s=0 then goto 1 else goto 2;
1: gamma:=0;
goto 3;
2: write('Ведіть азимутальний кут нахилу СК');
readln(gamma);
3: clrscr;
writeln('Сьогодні',n,'-й день року');
delta:=23.45*sin(2*pi*(284+n)/365);
ctet:=sin(delta*pi/180)*sin(fi*pi/180)*cos(s*pi/180)-
    sin(delta*pi/180)*cos(fi*pi/180)*sin(s*pi/180)*cos(gamma*pi/180)+
    cos(delta*pi/180)*cos(fi*pi/180)*cos(s*pi/180)*cos(w*pi/180)+
cos(delta*pi/180)*sin(fi*pi/180)*sin(s*pi/180)*cos(gamma*pi/180)*cos(w*pi/180)+co
s(delta*pi/180)*sin(s*pi/180)*sin(gamma*pi/180)*sin(w*pi/180);
tet:=arctan(sqrt(1-sqr(ctet))/ctet)*180/pi;
{ctet:=sin(delta*pi/180)*sin(fi*pi/180)+cos(delta*pi/180)*cos(fi*pi/180)*cos(w*pi/180
);
tetz:=arctan(sqrt(1-ctet*ctet)/ctet);}
cws:=-sin(fi*pi/180)*sin(delta*pi/180)/(cos(fi*pi/180)*cos(delta*pi/180));
Td:=(2/15)*arctan(sqrt(1-sqr(cws))/cws)*180/pi;
Td:=24-abs(Td);
writeln('Широта Ф=',fi:4:1,' град.');
writeln('Схилення δ=',delta:4:1,' град.');
writeln('Годинний кут ω=',w:4:1,' град.');
writeln;
writeln('Кут падіння потоку сонячного випромінювання θ=',tet:4:1,' град.');
{writeln('cos(tet) =',ctet:7:5);}
writeln('Довгота дня =',Td:4:1,'годин');
end
```

В2. ОПТИМАЛЬНОГО КУТА НАХИЛУ СОНЯЧНОГО КОЛЕКТОРА ДЛЯ ОПАЛЮВАЛЬНОГО СЕЗОНУ

```
program sun ‘на алгоритмічній мові Turbo Pascal
uses crt,graph;
  const
  mn=0.25;pi=3.1415927;
 type
  ar1=array [1..12] of integer;
  ar2=array [1..12,1..35] of real;
 var
  pausa :char;
  fi,delta,cws,ws,gamma :real;
  n,m,month,hr,min,j  :integer;
  day :ar1;
  H0  :ar2;
(*$i gr1*)
begin
clrscr;
day[1]:=15;day[2]:=45;day[3]:=74;day[4]:=105;day[5]:=135;day[6]:=166;
day[7]:=196;day[8]:=227;day[9]:=258;day[10]:=288;day[11]:=319;day[12]:=349;
for n:=1 to 12 do
 begin
fi:=35;
j:=1;
 while fi<=65 do
  begin
delta:=23.45*sin(2*pi*(284+day[n])/365);
cws:=-sin(fi*pi/180)*sin(delta*pi/180)/(cos(fi*pi/180)*cos(delta*pi/180));
ws:=abs(arctan(sqrt(1-sqr(cws))/cws)*180/pi);
H0[n,j]:=(24/pi)*(3600*1353)*((1+0.033*cos(2*pi*day[n]/365))*
(cos(fi*pi/180)*cos(delta*pi/180)*sin(ws*pi/180)+(2*pi*ws/360)*
sin(fi*pi/180)*sin(delta*pi/180)))/1000000;
writeln('Ho=',H0[n,j]:15:1);
fi:=fi+1;
j:=j+1;
 end;
pausa:=readkey;
repeat until keypressed;
end;
gr1(H0);
pausa:=readkey;
repeat until keypressed;
```

ДОДАТОК Г
ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ПОПЕРЕДНЬОГО ПІДІГРІВУ ВОДИ В СК ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ ПРОГРАМНОГО ПРОДУКТУ RETSCREEN [32]

	Unit	Climate data location	Facility location	Source
Latitude		46,4	46,4	
Longitude		30,8	30,8	
Climate zone		5A - Cool - Humid		Ground+NASA
Elevation	m	42	0	Ground – Map
Heating design temperature	°C	-11,1		Ground
Cooling design temperature	°C	29,8		Ground
Earth temperature amplitude	°C	20,3		NASA

Month	Air temperature	Relative humidity	Precipitation	Daily solar radiation - horizontal	Atmospheric pressure	Wind speed	Earth temperature	Heating degree-days 18 °C	Cooling degree-days 10 °C
	°C	%	mm	kWh/m²/d	kPa	m/s	°C	°C-d	°C-d
January	-1,7	82,9%	38,75	0,97	101,5	4,4	2,1	611	0
February	-1,0	80,2%	34,44	1,64	101,5	4,6	2,0	532	0
March	2,6	77,4%	32,55	2,68	101,4	4,7	4,5	477	0
April	9,0	73,8%	28,20	4,14	101,0	4,3	9,6	270	0
May	15,1	69,1%	34,72	5,62	101,1	3,9	16,2	90	158
June	19,4	69,2%	45,30	6,16	100,9	3,9	21,2	0	282
July	21,5	63,6%	36,89	6,15	100,9	3,8	24,1	0	357
August	21,2	64,2%	32,55	5,38	101,0	3,6	24,1	0	347
September	17,0	70,6%	41,70	3,99	101,3	3,8	19,2	30	210
October	11,2	76,3%	33,17	2,41	101,6	4,1	14,0	211	37
November	5,8	82,2%	39,00	1,09	101,6	4,5	8,7	366	0
December	1,4	83,1%	38,44	0,76	101,5	4,4	4,2	515	0
Annual	**10,2**	**74,3%**	**435,71**	**3,43**	**101,3**	**4,2**	**12,5**	**3 101**	**1 391**
Source	Ground	Ground	NASA	Ground	Ground	Ground	NASA	Ground	Ground
Measured at					m	10	0		

Water Heating Load Calculation		Estimate	Notes/Range
Application type	-	Service hot water	
System configuration	-	With storage	
Building or load type	-	School	
Number of units	Student	1	
Rate of occupancy	%	100%	50 to 100
Estim. hot water use (at ≈60 °C)	L/d	2	
Hot water use	L/d	12 000	
Desired water temperature	°C	60	
Days per week system is used	d	7	1 to 7
Cold water temperature	-	Auto	
Minimum	°C	13,7	1.0 to 10.0
Maximum	°C	21,6	5.0 to 15.0
Months SWH in use	month	3,5	
Ener. demand for months analysed	MWh	59,68	
	GJ	214,83	

Return to Energy Model sheet

Рисунок Г.1 – Кліматичні дані регіону

RETScreen® Energy Model - Solar Water Heating Project

Site Conditions		Estimate	Notes/Range
Project name		Solar collector with heat accumulator	
Project location		Odessa	
Nearest location for weather data		Odessa, Ukrain	Complete SR&HLC sheet
Annual solar radiation (tilted surface)	MWh/m²	2,01	
Annual average temperature	°C	17,7	
Annual average wind speed	m/s	3,2	
Desired load temperature	°C	60	
Hot water use	L/d	12 000	
Number of months analysed	month	3,5	
Energy demand for months analysed	MWh	59,68	

System Characteristics		Estimate	Notes/Range
Application type		Service hot water (with storage)	
Base Case Water Heating System			
Heating fuel type	-	Electricity	
Heating system seasonal efficiency	%	250%	60% to 300%
Solar Collector			
Collector type	-	Glazed	See Technical Note 1
Solar water heating collector manufacturer		ABC	See Product Database
Solar water heating collector model		XYZ	
Area per collector	m²	4,00	1.00 to 5.00
Fr (tau alpha) coefficient	-	0,85	0.50 to 0.90
Fr UL coefficient	(W/m²)/°C	11,56	3.50 to 6.00
Suggested number of collectors		25	
Number of collectors		1	
Total collector area	m²	4,0	
Storage			
Ratio of storage capacity to coll. area	L/m²	45,9	37.5 to 100.0
Storage capacity	L	184	
Balance of System			
Heat exchanger/antifreeze protection	yes/no	No	
Suggested pipe diameter	mm	10	8 to 25 or PVC 30 to 38
Pipe diameter	mm	38	8 to 25 or PVC 30 to 38
Pumping power per collector area	W/m²	0	3 to 22, or 0
Piping and solar tank losses	%	1%	1% to 10%
Losses due to snow and/or dirt	%	3%	2% to 10%
Horz. dist. from mech. room to collecto	m	5	5 to 20
# of floors from mech. room to collecto	-	2	0 to 20

Annual Energy Production (3,50 months analysed)		Estimate	Notes/Range
Pumping energy (electricity)	MWh	**0,00**	
Specific yield	kWh/m²	394	
System efficiency	%	52%	
Solar fraction for months analysed	%	3%	
Renewable energy delivered	MWh	**1,58**	
	GJ	5,68	
			Complete Cost Analysis sheet

Рисунок Г.2 – Ефективність гібридної системи

RETScreen® Cost Analysis - Solar Water Heating Project

Type of project: Custom | Currency: $ | Cost references: None

Initial Costs (Credits)	Unit	Quantity	Unit Cost	Amount	Relative Costs	Quantity Range	Unit Cost Range
Feasibility Study							
Site investigation	p-h	2	$ 40	$ 80		-	-
Preliminary design	p-h	0	$ -	$ -		-	-
Report preparation	p-h	0	$ -	$ -		-	-
Travel and accommodation	p-trip	0	$ -	$ -		-	-
Other	Cost	0	$ -	$ -		-	-
Sub-total :				$ 80	4.4%		
Development							
Permits and approvals	p-h	2	$ 40	$ 80		-	-
Project financing	p-h	0	$ -	$ -		-	-
Project management	p-h	0	$ -	$ -		-	-
Travel and accommodation	p-trip	0	$ -	$ -		-	-
Other	Cost	0	$ -	$ -		-	-
Sub-total :				$ 80	4.4%		
Engineering							
SWH system design	p-h	6	$ 40	$ 240		-	-
Structural design	p-h	1	$ 40	$ 40		-	-
Tenders and contracting	p-h	0	$ -	$ -		-	-
Construction supervision	p-h	0	$ -	$ -		-	-
Other	Cost	0	$ -	$ -		-	-
Sub-total :				$ 280	15.2%		
Renewable Energy /RE Equipment							
Solar collector	m²	4.0	$ 65	$ 260		-	-
Solar storage tank	L	184	$ -	$ -		-	-
Solar loop piping materials	m	27	$ 6.00	$ 160		-	-
Circulating pump(s)	W	0	$ -	$ -		-	-
Heat exchanger	kW	0.0	$ -	$ -		-	-
Transportation	project	1	$ 100	$ 100		-	-
Other	Cost	0	$ -	$ -		-	-
Sub-total :				$ 520	28.3%		
Balance of System							
Collector support structure	m²	4.0	$ -	$ -		-	-
Plumbing and control	project	1	$ 300	$ 300		-	-
Collector installation	m²	4.0	$ 10	$ 40		-	-
Solar loop installation	m	27	$ 2.00	$ 53		-	-
Auxiliary equipment installatic	project	1	$ 50	$ 50		-	-
Transportation	project	1	$ 50	$ 50		-	-
Other	Cost	0	$ -	$ -		-	-
Sub-total :				$ 493	26.8%		
Miscellaneous							
Training	p-h	4	$ 60	$ 240		-	-
Contingencies	%	10%	$ 1 453	$ 145		-	-
Sub-total :				$ 385	21.0%		
Initial Costs - Total				$ 1 838	100.0%		

Annual Costs (Credits)	Unit	Quantity	Unit Cost	Amount	Relative Costs	Quantity Range	Unit Cost Range
O&M							
Property taxes/insurance	project	0	$ -	$ -		-	-
O&M labour	project	1	$ 15	$ 15		-	-
Other	Cost	0	$ -	$ -		-	-
Contingencies	%	10%	$ 15	$ 2		-	-
Sub-total :				$ 17	100.0%		
Fuel/Electricity	kWh	0	$ -	$ -	0.0%	-	-
Annual Costs - Total				$ 17	100.0%		

Periodic Costs (Credits)		Period	Unit Cost	Amount	Interval Range	Unit Cost Range
Valves and fittings	Cost	10 yr	$ 250	$ 250	-	-
Pool heat pump compressor	Credit	10 yr	$ 1 200	$ (1 200)	-	-
				$ -	-	-
End of project life		-		$ -	Go to GHG Analysis sheet	

Рисунок Г.3 – ТЕП гібридної системи з екранованими СК і ТА

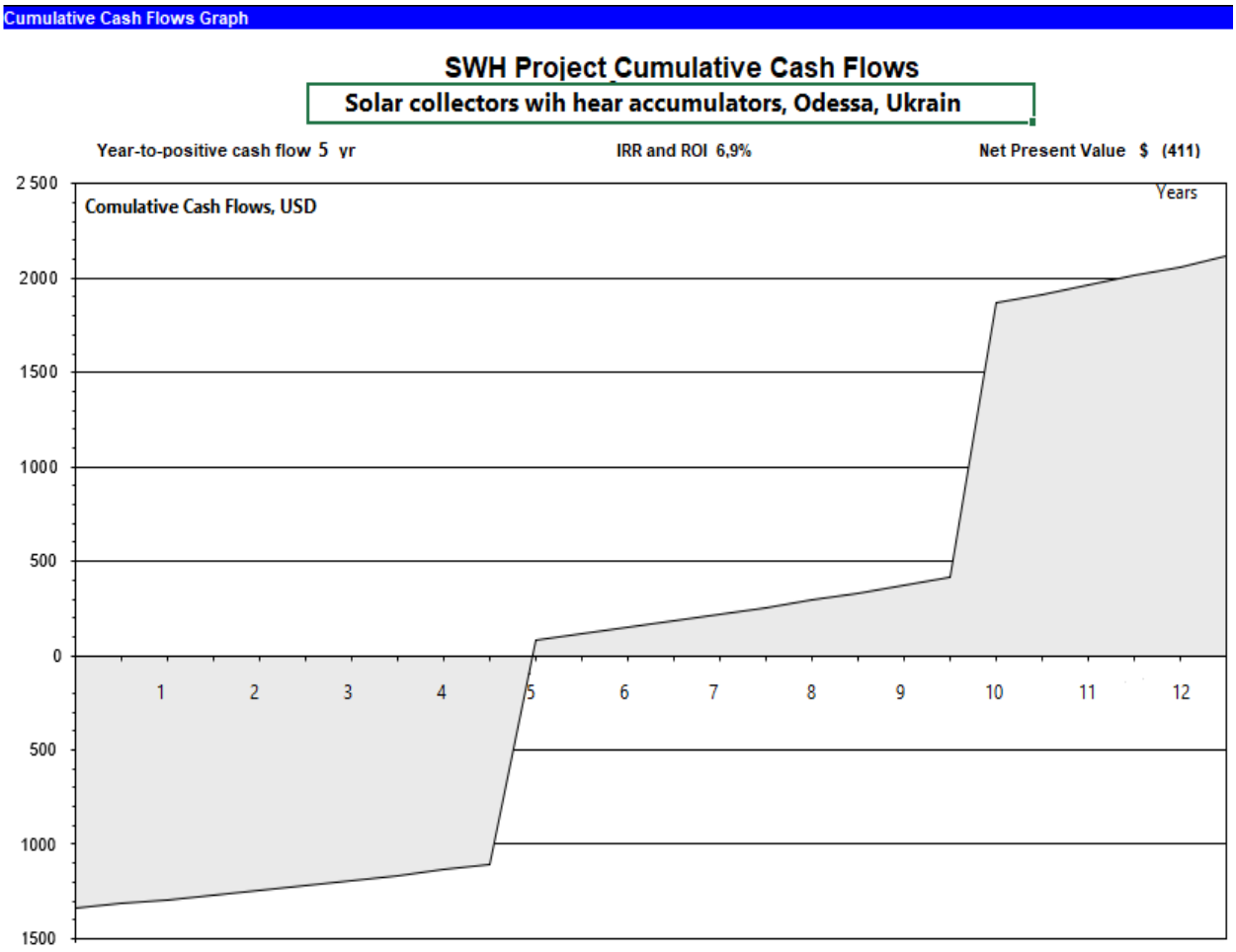

Рисунок Г.4 – Строк окупності гібридної системи з екранованими СК і акумуляторами теплоти

ДОДАТОК Д
ПОРІВНЯННЯ ТЕПЛОНАСОСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ З ІНШИМИ ТЕХНОЛОГІЯМИ ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В ТЕПЛОТУ ПРИ ВИКОРИСТПАННІИ ЗВДЕ ТА АКУМУЛЯТОРІВ ТЕПЛОТИ

ТНУ, які використовують різнорідні ЗВДЕ, здатні виробляти теплоту, яка перевищує попит протягом певного часу доби, коли наявною є досить висока інтенсивність НПТ, яка надходить до випарника ТН. Надлишок енергію можна раціонально використовувати за допомогою акумуляторів теплоти сумісно з різнорідними ЗВДЕ і тепловими насосами (рисунок Д.1).

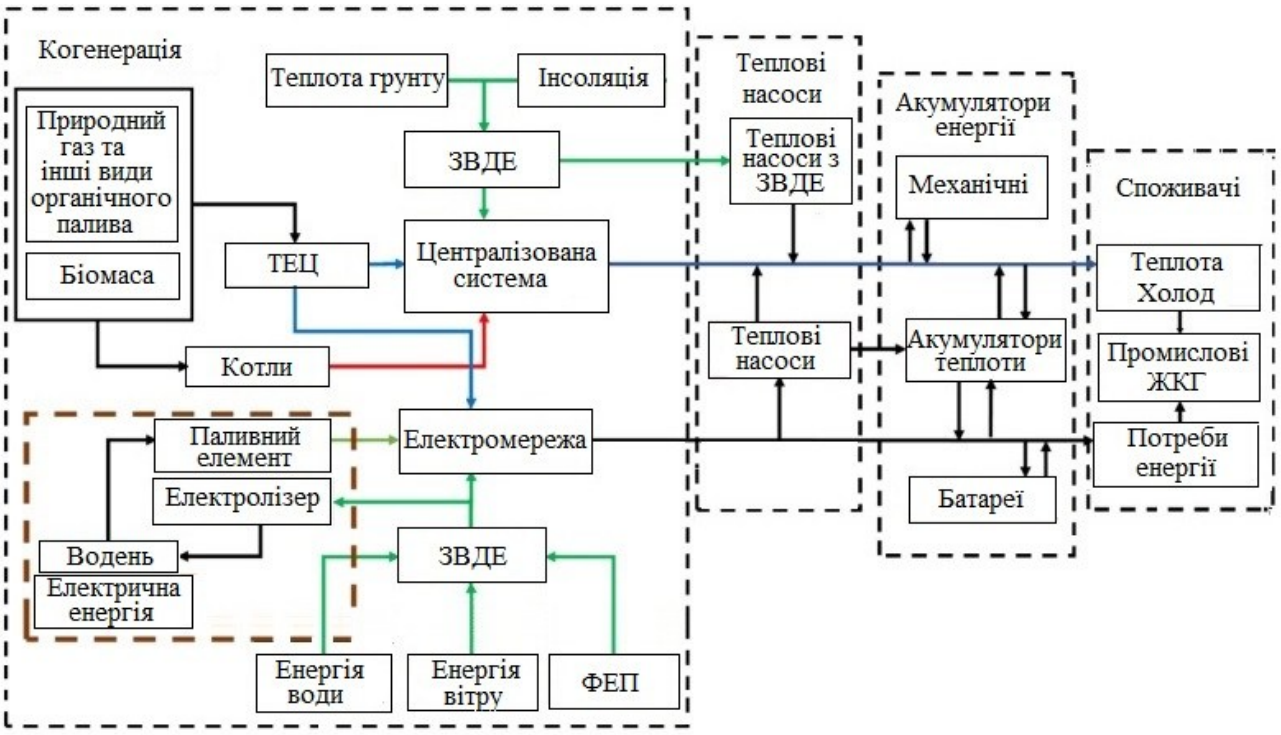

Рисунок Д.1 – Когенераційна система з використанням різнорідних ЗВДЕ

Більшість технологій перетворення електроенергії в теплоту передбачають використання засобів акумулювання енергії [54]. При цьому, теплові насоси більш енергоефективні, ніж інші енерготехнології, бо одна одиниця електроенергії, що використовується ТН, дозволяє отримати більше трьох одиниць теплоти протягом опалювального сезону.

Протягом останніх десятиліть спостерігається тенденція до неухильного зростанні ефективності ТНУ завдяки вдосконаленню їх схемно-конструктивних

рішень. В сучасних роботах системний підхід до обґрунтування схемно-конструктивних рішень щодо теплонасосної системи з ЗВДЕ та баком-акумулятором для систем теплопостачання при постійних та переривчастих режимах роботи використовується явно недостатньо [54 – 56], хоча теплові акумулятори у схемі ТН – це інноваційний засіб удосконалення ефективності гібридної системи децентралізованого теплозабезпечення. При цьому, ТА може збільшити частку використання ЗВДЕ та зменшити споживання енергії на власні потреби ТНУ [57–62]. Використання бака-акумулятора для удосконалення режимів роботи ТНУ досліджено в роботі [60–62], але рекомендацій щодо оптимальних параметрів баком-акумулятору ТНУ відсутні.

Для моделювання функціонування теплонасосної, з метою визначення її ефективності, використовуються такі параметри:

Q_{HP} – теплова потужність, COP – коефіцієнт трансформації, геометричні параметри ОТ, тип опалювальних пристроїв та кліматичні умови [62].

COP теплового насоса можна оцінити шляхом аналізу характеру зміни графіку COP, який показує зміну кількості енергії, яка витрачається на власні потреби функціонування ТНУ, порівняно з кількістю теплоти, що передається споживачеві теплоти (рисунок Д.2). Балансова точка на кривій COP для теплового насоса – є найважливішою межею доцільності використання ТНУ (критичною точкою), після якої режим роботи ТН стає неефективним, бо теплової енергії для потреб споживача буде отримуватись менше, ніж буде використано на електричний привід ТН. В цьому випадку необхідно передбачити можливість переходу на резервне джерело енергії.

В якості прикладу, на рисунку Д.2 балансова точка, яка показана на графіку відповідає температурі довкілля > мінус 5 ºС. Зблизь балансової точки при меншій тепловій потужності використання теплового насосу стає вже неефективним, бо теплові втрати перевищують корисну потужність.

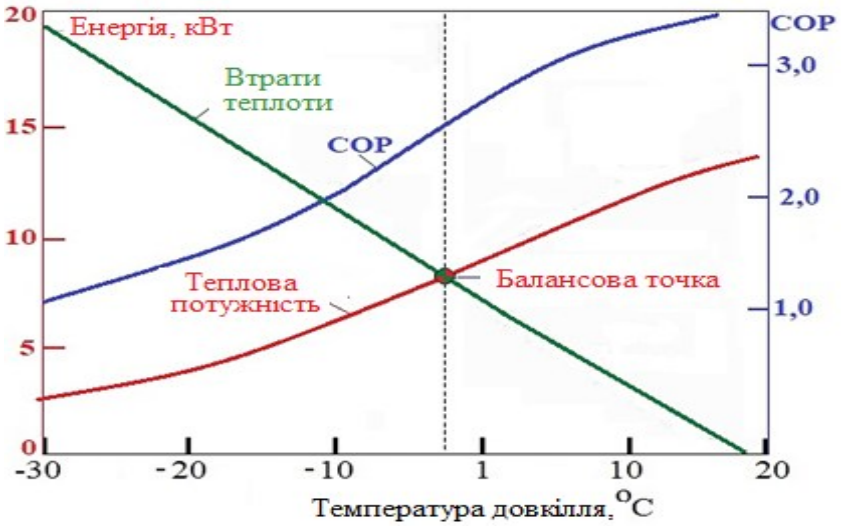

Рисунок Д.2 – Крива COP та межа доцільності використання ТНУ

Таким чином, зменшення теплових втрат є важливою задачею підвищення ефективності роботи децентралізованої системи теплозабезпечення з генераторами теплоти на основі теплонасосних технологій. Так, зменшення втрат енергії в довкілля в зимовий сезон, наприклад, від інфільтрації, є особливо важливим, бо зовнішнє повітря крізь отвори теплолокалізаційних систем вривається в приміщення. Засоби, які здатні зменшити площу перерізу для руху повітря, скорочують втрати теплоти в енергобалансі системи і є засобами кумулятивного ефекту збереження теплоти [40].

ДОДАТОК Є
РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ
Є.1. ФУНКЦІОНУВАННЯ ДСТ З ТЕПЛОВИМ НАСОСОМ І АКУМУЛЮВАННЯМ ТЕПЛОТИ

Дослідження ДСТ з ТН і БА виконувались в навчальній лабораторії Національного університету “Одеська політехніка”.

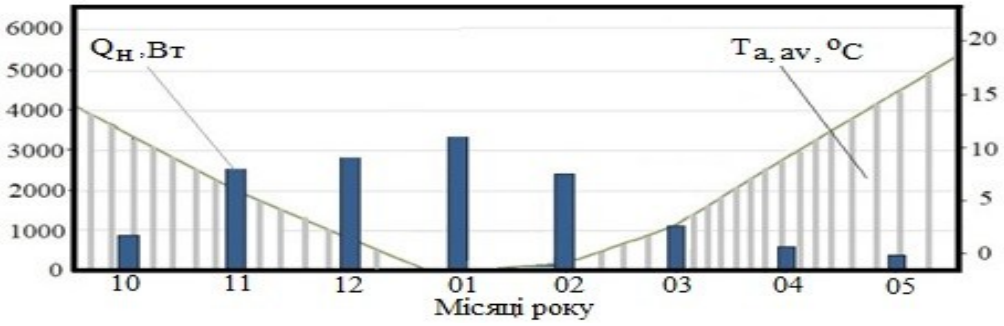

Рисунок Є.1.1 – Теплова потужність $Q_н$ і середньомісячна температура ($T_{a,av}$) протягом опалювального сезону в м. Одеса

Надходження додаткової теплоти визначалось протягом доби, результати наведено в Додатку Є (рисунки, Є.2 і Є.3). Розрахункове теплове навантаження узгоджується з тепловою потужністю ТНУ.

Рисунок Є.1.2 – Додаткові надходження теплоти

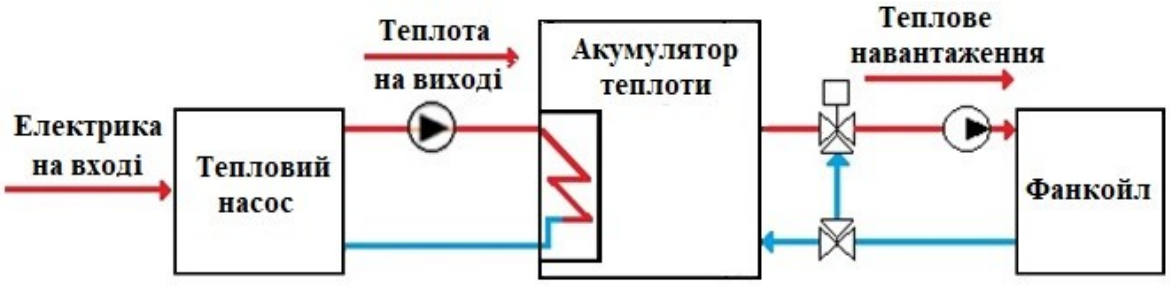

Рисунок Є.1.3 – ТН з БА і фанкойлом

Є.2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ СТЕНД ТА ЕЛЕМЕНТИ ТЕПЛОНАСОСНОЇ СИСТЕМИ ТА АКУМУЛЯТОРОМ ТЕПЛОТИ У СКЛАДІ ДСТ

Рисунок Є.2.1 – Тепловий пункт

Рисунок Є.2.2 – Теплонасосний контур

Рисунок Є.2.3 – – Фанкойл фірми Vito

Рисунок Є.2.4 – – Бак-акумулятор теплоти ТНУ навчального корпусу №10

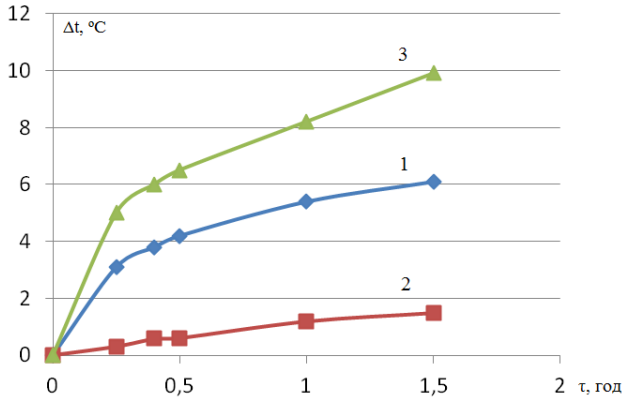

Рисунок Є.2.5 – – Порівняння швидкості нагріву навчального приміщення в теплотехнічній лабораторії НУОП з використанням:
1 –фанкойла; 2 –радіатора;3 –фанкойли при термомодернізації;

Рисунок Є.2.6 – Бак-акумулятор теплоти

Рисунок Є.2.7 – Резервні генератори теплоти:
1 – конденсаційний газовий котел з бойлером, 28 кВт;
2 – двоконтурний конденсаційний котел;
3 – двоконтурний безконденстний котел, 24 кВт,

ДОДАТОК Ж

ВИСНОВКИ ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Україна
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ОДЕСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

КОД ЄДРПОУ 43861328

пр.Шевченка, 1, м.Одеса, 65044
Україна
тел. +38 048 7223474
факс. +38 048 7221992
E-mail: mail@op.edu.ua

21.05.2025 № 854/157-07
на №

ДОВІДКА

про використання результатів дисертаційного дослідження аспіранта Національного університету «Одеська політехніка» Сергеєва Миколи Ігоровича на тему: «Підвищення ефективності децентралізованого теплопостачання за рахунок використання відновлювальних джерел енергії та гібридних засобів акумулювання теплоти», представленої на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 144 –теплоенергетика

Надана Сергеєву Миколі Ігоровичу в тому, що матеріали дисертаційного дослідження використовуються при підготовці бакалаврів і магістрів за освітньою програмою «Відновлювані джерела енергії та енергокомплекси, в Українсько-польському навчально-науковому інституті на кафедрі «Теоретичної, загальної та нетрадиційної енергетики» у наступних навчальних дисциплінах :

– *Першого (бакалаврського) рівня вищої освіти:* «Теплові двигуни енергетичних комплексів», «Моделювання теплових процесів в енергокомплексах»

– *Другого (магістерського) рівня вищої освіти:*

«Теплові насоси та кондиціонери», «Інноваційні технології відновлюваної енергетики».

Довідка надана у зв'язку із захистом дисертації

Перший проректор, д.т.н., проф. Сергій НЕСТЕРЕНКО

НАУКОВИЙ ПАРК
ОДЕСЬКОГО ПОЛІТЕХНІЧНОГО
УНІВЕРСИТЕТУ
пр. Шевченка, 1, Адмін. корпус, каб. 109, м. Одеса, 65044 Україна
тел.: +38 048 705 83 76, факс: +38 0482 344 273

На № 21.05.2025 № 01/05

ДОВІДКА

про впровадження результатів дисертаційного дослідження аспіранта Національного університету «Одеська політехніка» Сергєєва Миколи Ігоровича на тему: «Підвищення ефективності децентралізованого теплопостачання за рахунок використання відновлювальних джерел енергії та гібридних засобів акумулювання теплоти»

Підтверджуємо, що наукові результати дисертації на здобуття наукового ступеня доктора філософії М.І.Сергєєва впроваджені в діяльності Наукового парку Національного університету «Одеська політехніка», згідно Договору №1 від 12.03.2021 р з Полонійною Академією, м. Ченстохова, Польща «Про проведення комплексу заходів щодо організації навчання та освітньо консультативних послуг щодо обміну студентів за Програмою Подвійний диплом», при консультуванні студентів протягом переддипломної практики в Науковому парку Національного університету «Одеська політехніка» та при підготовці кваліфікаційних робіт:

І. Бакалаврів Українсько-польського навчально наукового інституту (2021 н.р.):

– Геращенка С.О., гр. ЛЛН-171 кафедри загальної теоретичної та нетрадиційної енергетики на тему: «Підвищення ефективності роботи теплонасосних установок для використання циркуляційної води когенераційного енергоблоку»;

ІІ. Магістрів Українсько-польського навчально наукового інституту (2022 р):

– Баланчука В.С. гр. ЛЛН-171, кафедра загальної теоретичної та нетрадиційної енергетики Українсько-польського навчально наукового інституту на тему: «Розробка системи теплозабезпечення будинку з використанням сонячних колекторів і теплового насосу»;

– Новотного В.О. ЛЛН-171, кафедра загальної теоретичної та нетрадиційної енергетики на тему: «Теплонасосне енергозабезпечення будівель громадського призначення з використанням потенціалу повітря Одеських катакомб».

Результати дисертаційного дослідження наукового ступеня доктора філософії М.І. Сергєєва мають теоретичну і практичну цінність, відповідають сучасним вимогам енергозберігаючих технологій і можуть бути рекомендовані до впровадження завдяки використанню:

1. Науково-методичному підходу до обґрунтування ефективності процесів в елементах децентралізованих систем теплозабезпечення з використанням теплонасосних технологій на базі відновлюваних джерел енергії і гібридних засобів акумулювання теплоти шляхом математичного моделювання процесів в елементах системи з урахуванням регіональних умов
2. Інструментарію вдосконалення енерготехнологій для паливно-енергетичного сектору України
3. Інноваційних технологій енергозбереження , які сприяють збільшенню ефективності генерації енергії та захисту довкілля

Генеральний директор, д.т.н., професор Козлов І.Л.

УКРАЇНА * М. ОДЕСА * ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ "НАУКОВИЙ ПАРК ОДЕСЬКОГО ПОЛІТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ" код 39570137