

АНОТАЦІЯ

Іванов П.О. **Підвищення ефективності альтернативного теплопостачання за рахунок енергії ґрунту, ґрунтових та стічних вод.** – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

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

У вступі висвітлено актуальність та досвід застосування сучасних технологій генерації теплоти на базі теплонасосних циклів з використанням енергії ґрунту (ГЕ), ґрунтових (ГВ) і стічних вод (СВ).

Альтернативне теплопостачання за рахунок використання низькопотенційної енергії ґрунту, ґрунтових та стічних вод для парокомпресійного теплового насосу (ТН) належить до енергоощадних інноваційних технологій завдяки збільшенню енергетичної ефективності циклу ТН та зменшенню шкоди довкіллю за рахунок декарбонізації технологічних процесів в системі.

На підставі аналізу результатів сучасних світових та вітчизняних досліджень, зважаючи на гостру потребу у застосуванні інноваційних методів генерації теплоти, можна зробити висновок, що запитом практики є розробка науково-обґрунтованого інструментарію для вдосконалення енергетичних, екологічних, режимних та схемно-конструктивних параметрів функціонування теплонасосних систем на базі енергії ґрунту, ґрунтових та стічних вод, які відповідають енергозберігаючим засадам і можуть бути застосовані широким спектром споживачів галузі.

Для обґрунтування доцільності застосування інноваційних теплонасосних методів генерації теплоти на базі енергії ґрунту, ґрунтових та стічних вод, має бути застосований інструментарій, з використанням методів математичного моделювання, що дозволяє підвищити енергетичну і екологічну ефективність технологічних і схемно-конструктивних рішень для їх практичної реалізації, за умов, що прийняті до уваги енергетична спроможність низькопотенційних

відновлюваних джерел енергії для надійного теплозабезпечення, з урахуванням кліматичних особливостей.

Але, незважаючи на актуальність потреб у застосуванні інноваційних технологій теплозабезпечення та чисельні дослідження в вказаному напрямку, широкому розповсюдженню теплонасосних технологій, з використанням енергії ґрунту, ґрунтових і стічних вод, заважає відсутність узагальненого інструментарію обґрунтування рішень, спрямованих на удосконалення енергетичних і екологічних чинників функціонування системи, здатних забезпечити сталий термічний стан джерел альтернативної енергії для теплонасосних систем при їх довготривалій експлуатації.

Таким чином, для обґрунтування режимів раціонального використання теплонасосних систем на базі енергії ґрунту, ґрунтових та скидних вод необхідно застосовувати узагальнений інструментарій, з використанням методів математичного моделювання, на основі визначати умови функціонування системи, що не шкодять довкіллю, її схемно-конструктивні, теплові та режимні характеристики, з урахуванням кліматичних чинників та регіонального технічного потенціалу низькопотенційних альтернативних джерел енергії (НАДЕ), які здатні надійно забезпечувати потреби споживачів з максимальним коефіцієнтом заміщення викопного палива.

Таким чином, узагальнений інструментарій (УІ) удосконалення теплонасосних систем (ТНС) на базі енергії ґрунту, ґрунтових та скидних вод має гарантувати ефективний перебіг процесів в елементах ТНС при довготривалій експлуатації без термічного виснаження НАДЕ, при відборі ГЕ, ГВ і СВ для випарника ТН, що є актуальною науково-технічною задачею, якій присвячено дане дослідження.

У вступі дисертаційної роботи 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 ефективного використання сучасних технологій генерації енергії, встановлені їх переваги та

недоліки. Показано, що для ефективного впровадження системи теплозабезпечення з раціональним використанням в теплонасосних установках (ТНУ) енергії ґрунту, ґрунтових та скидних вод задля вирішення проблем енергозбереження, з урахуванням регіональних можливостей і потреб споживачів, необхідним є розробка математичної моделі, яка спроможна визначити раціональні режими роботи системи, які попереджають промерзання ґрунту – негативний екологічний ефект, який може виникати при довготривалій експлуатації ТНС.

Отже, виникає актуальне науково-практичне завдання підвищення ефективності і зменшення теплового забруднення довкілля шляхом вдосконалення режимів роботи системи альтернативного теплозабезпечення, що забезпечує зростання коефіцієнта заміщення викопного палива.

Альтернативні технології для кліматичних умов України характерні наявністю технічного потенціалу енергії ґрунту, ґрунтової та скидної води, який доцільно утилізувати в теплонасосних установках і корисно використовувати для теплозабезпечення різномірних споживачів. Рішення про доцільність впровадження такої системи енергозабезпечення приймається за результатами визначення ефективності роботи теплонасосних установок, з використанням енергії ґрунту, ґрунтових та скидних вод, за енергетичними, економічними, екологічними та соціальними чинниками.

Слід зауважити, що, незважаючи на необхідність застосування та численні дослідження, які спрямовані на практичну реалізацію ТНС на базі енергії ґрунту, ґрунтової та скидної води для регіональних умов, заважає недостатня ефективність існуючих в теперішній час рішень, які дозволяють прогнозувати та запобігати фазового перетворення вологи в ґрунтовому масиві навколо ґрунтового контуру ТНС, тобто без шкідливого екологічного впливу. Для вирішення цього завдання дослідження запропоновано інструментарій вдосконалення режимів роботи різномірних ТНС енергозабезпечення на базі енергії ґрунту, ґрунтової та скидної води, технічний потенціал яких визначається регіональними умовами.

Сформульовано перший пункт наукової новизни, який полягає в наступному: для підвищення ефективності систем енергозабезпечення, з

раціональним використанням теплонасосної системи на базі різнорідних ВДЕ (енергії ґрунту, ґрунтової та скидної води), необхідно запропонувати інструментарій математичного моделювання функціонування ТНС з використанням різнорідних НАДЕ, з урахуванням їх технічного потенціалу та регіональних кліматичних умов, як засобу енергозбереження, що призведе до корисних ефектів: енергетичного (зменшить частку використання традиційних первинних енергетичних ресурсів) та екологічного (зменшить теплову шкоду довкіллю) при довготривалій експлуатації вказаних теплонасосних систем.

У розділі 2 обґрунтовано умови раціонального використання теплонасосної системи на базі енергії ґрунту (ГЕТНС) для цілей теплопостачання, з використанням інструментарію математичного моделювання нестационарних теплових процесів в ГЕТНС. За результатами чисельного моделювання розроблено рекомендації щодо підвищення ефективності і надійності функціонування ГТНС, без погіршення термічного стану масиву ґрунту навколо ґрунтових зондів при довготривалій роботі ГЕТНС. Запропонований нами інструментарій нестационарних теплових процесів в ґрунтовому масиві дозволив в 1,5 разів підвищити точність розрахунку кумулятивної теплоти, яка надходить від ґрунту до випарника теплового насосу, з урахуванням різної інтенсивності тепловідводу від ґрунту по висоті ґрунтової трубки. Крім того, обґрунтовано умови підвищення ефективності роботи ґрунтового зонду за рахунок зменшення протяжності зони теплообміну з паровою фазою, де інтенсивність теплообміну вдвічі менша та встановлена відносна питома площа ґрунтових зондів на 1 м² опалювальних приміщень.

Другий пункт наукової новизни полягає в наступному: визначено раціональні умови функціонування теплонасосної системи на базі енергії ґрунту (ГЕТНС) в режимах теплопостачання, з використанням запропонованого інструментарію математичного моделювання нестационарних теплових процесів в елементах ГЕТНС на засадах енергозберігаючих технологій, з урахуванням кліматичних умов. Запропоновано схемно-конструктивні, технологічні та режимні параметри ГЕТНС, які забезпечують екологічні переваги системи завдяки попередженню стану

фазового переходу в масиві ґрунту навколо ґрунтових зондів при довготривалому функціонуванні теплонасосної системи. Запропонований нами інструментарій нестационарних теплових процесів в ґрунтовому масиві дозволив в 1,5 разів підвищити точність розрахунку кумулятивної теплоти

У розділі 3 обґрунтовано умови раціонального використання теплонасосної системи на базі ґрунтових вод (ГВТНС) для опалення і кондиціонування, з використанням інструментарію математичного моделювання нестационарних теплових процесів в ГВТНС. За результатами чисельного моделювання розроблено рекомендації щодо підвищення ефективності і надійності функціонування ГВТНС в режимах опалення і кондиціонування без шкоди довкіллю, що забезпечується за рахунок організації регенерації теплоти при знакозмінних напрямках потоків ґрунтової води, а саме, при відборі теплоти ГВ від СГВ для цілей опалення і скиді теплоти ГВ в СГВ для цілей кондиціонування, що стабілізує термічний стан масиву ґрунту навколо СГВ, наближаючи його до фонового, при довготривалому функціонуванні теплонасосної системи для широкого спектру теплових споживачів.

Третій пункт наукової новизни полягає в наступному: визначено раціональні умови функціонування теплонасосної системи на базі ґрунтових вод (ГВТНС) в режимах опалення і кондиціонування, з використанням запропонованого інструментарію математичного моделювання нестационарних теплових процесів в елементах ГВТНС на засадах енергозберігаючих технологій, з урахуванням кліматичних умов. Запропоновано схемно-конструктивні, технологічні та знакозмінні режимні цикли роботи ГВТНС, які забезпечують екологічні переваги системи завдяки нормалізації термічного стану масиву ґрунту навколо СГВ, наближаючи його до природного стану при довготривалому функціонуванні системи при знакозмінних напрямках потоків ґрунтової води.

У розділі 4 обґрунтовано умови раціонального використання теплонасосної системи на базі енергії скидних вод (СВТНС) для цілей теплопостачання, з використанням інструментарію математичного моделювання теплових процесів в теплообміннику-випарнику. За результатами чисельного моделювання

обґрунтовано доцільність використання теплонасосних систем на базі скидних вод промислового і побутового призначення. Запропонована нами методика дозволяє визначати ефективність роботи теплообмінних поверхонь теплонасосної системи без шкоди навколишньому середовищу.

Четвертий пункт наукової новизни полягає в наступному: запропоновано інструментарій чисельного моделювання ефективність застосування теплонасосних систем на базі скидних вод промислового і побутового призначення без шкоди довкіллю Розроблено рекомендації щодо оптимізації параметрів випарників СВТНС, які забезпечують заміщення викопних ПЕР

Ключові слова: математичне моделювання, нестационарні теплові процеси, інструментарій моделювання, фазові перетворення, термічний стан, низькопотенційні джерела енергії, енергія ґрунту, ґрунтові води, скидні води, теплообмінники, теплонасосна система, кумулятивна теплота, енергоефективність.

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. 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. – Available from: DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2024.2-62.10> (*Indexed in SCOPUS*)

2. Denysova A.E., Ivanov P.O. The toolkit of numerical modelling of the operating modes of the geothermal heat pump for heating and cooling with the account of climate conditions // Refrigeration Engineering and Technology, 2026 . – P. 1 – 14. – Available from: <https://journals.ontu.edu.ua/index.php/reftech/article/view/3380>

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

3. Денисова А.Є., Іванов П.О. Математичне моделювання нестационарних 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: DOI: <https://doi.org/10.20998/2220-4784.2023.02.02>

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

4. 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. P. 352–362. – Режим доступу: DOI: <https://doi.org/10.15276/hait.06.2023.23>

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

5. Alla Denysova, Svitlana G. Antoshchuk, Pavlo O. Ivanov, Olena O. Arsirii, Anastasiya S. Troynina. Modelling of the temperature field in the soil massive for different operating modes of the ground source heat pump // Applied Aspects of Information Technology. 2024, N7 (3): 242–254. Режим доступу: <https://doi.org/10.15276/aait.07.2024.17>

<https://tests.hait.od.ua/index.php/journal/article/view/15>

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

6. A. Mazurenko, O. Klymchuk, G. Luzhanska, P. Ivanov, I. Sergeiev. Ensuring increased reliability and efficiency of heat supply systems due to the use of microturbines in conditions of unstable power supply// Proceedings of Odessa Polytechnic University, Issue 2(66), 2022 – P.58-63. Режим доступу: DOI: 10.15276/opu.2.66.2022.07

<https://doi.org/10.15276/opu.2.66.2022.07>

<https://pratsi.op.edu.ua/index.php/pratsi/article/view/33/33>

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

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

7. Іванов П.О., Шилов П.О. Ефективність роботи теплового насосу у послідовно- паралельній схемі системи опалення// 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. 751. Режим доступу: <https://ndch.kpi.kharkov.ua/wp-content/uploads/2025/05/Zbirnik-tez-2025.pdf>

8. Іванов П.О., Чабан А.О. Підтримка умов мікроклімату на засадах енергозберігаючих технологій // 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. 750. Режим доступу: <https://ndch.kpi.kharkov.ua/wp-content/uploads/2025/05/Zbirnik-tez-2025.pdf>

9. Денисова А. Є., Іванов П. О. Ексергетична ефективність теплонасосних технологій для когенераційних потреб// Proceedings of XI International conference "Informatics. Culture. Technique". Інноваційні енергетичні технології, Одеса, 16–17 жовтня 2025 р., №2.–С.548–554. <https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.82>

10. Іванов П.О. Методика визначення температури теплоносія на виході з ґрунтового теплообмінника теплонасосної системи // VIII International scientific and practical conference VIII International scientific and practical conference «Scientific Research as a Mechanism of Effective Human Development» (January 31-February 2, 2024) Sofia, Bulgaria, International Scientific Unity. 2024. С.341–344. – Режим доступу: https://isu-conference.com/wp-content/uploads/2024/03/Scientific-research-as-a-mechanism-of-effective-human-development_Jan_31_Feb_2_2024_Sofia_Bulgaria.pdf

11. А.Є.Денисова, П.О.Іванов. Модель нестационарних теплових процесів в ґрунтовій теплонасосній системі // Proceedings of X International conference "Informatics. Culture. Technique" . Інноваційні енергетичні технології, 2024, Vol. 1, N1. – Р.315–322. DOI: <https://doi.org.10.15276/ict.01.2024.49>

12. Іванов П.О., Мазуренко А.С. Забезпечення ефективності теплонасосної системи // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей XXXII міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2024, 22-25 травня 2024 р. / за ред. проф. Сокола Є.І. – Харків: НТУ «ХПІ». – С. 583. Режим доступу: <https://science.kpi.kharkov.ua/wp-content/uploads/2024/05/Zbirnik-tez-MicroCAD-2024.pdf>

13. Мазуренко А.С., Іванов П.О., Шавров В.В. Перспективи використання води свердловин для теплонасосних систем тепlopостачання // Proceedings of the

XVIII International Scientific and Practical Conference “Theoretical and applied aspects of the development of science”. Bilbao, Spain. May 09 – 12, 2023. – С.471-474. Режим доступу: <https://isg-konf.com/uk/theoretical-and-applied-aspects-of-the-development-of-science/>

14. Мазуренко А.С., Лужанська Г.В., Іванов П.О., Гафінчук В.М.,Хавара Ю.П. Використання мікротурбін автономного енергозабезпечення в міському та сільському господарстві // II Міжнародна науково-практична конференція “Modern education using the latest technologies”, 17-20 січня 2023 р., Лісабон, Португалія. –С 468– 470. Режим доступу: <https://isg-konf.com/uk/modern-education-using-the-latest-technologies/>

ABSTRACT

Ivanov P.O. Increasing the efficiency of alternative heat supply through soil, groundwater and wastewater energy.

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, 2026

The introduction highlights the relevance and experience of applying modern heat generation technology based on heat pump cycles using soil energy (SE), groundwater (GW) and wastewater (WW).

Alternative heat supply through the use of low-potential soil energy, groundwater and wastewater for the vapor compression heat pump (HP) is an energy-saving innovative technology due to increasing the energy efficiency of the HP cycle and reducing environmental damage due to decarbonization of technological processes in the system elements.

Based on the analysis of the results of modern global and domestic research, given the urgent need for the application of innovative heat generation methods, it can be concluded that the demand of practice is the development of scientifically based tools for improving the energy, environmental, regime and schematic and design parameters of the functioning of heat pump systems based on soil energy, groundwater and wastewater, which meet energy-saving principles and can be used by a wide range of industry consumers.

To substantiate the feasibility of using innovative heat pump methods for heat generation based on soil energy, groundwater and wastewater, tools should be used using mathematical modelling methods that allow increasing the energy and environmental efficiency of technological and schematic and design solutions for their practical implementation, under the conditions that take into account the energy capacity of low-potential renewable energy sources for reliable heat supply, taking into account climatic features.

But, despite the relevance of the needs for the application of innovative heat supply technologies and numerous studies in this direction, the widespread use of heat pump

technology using soil energy, groundwater and wastewater is hindered by the lack of a generalized toolkit for substantiating solutions aimed at improving the energy and environmental factors of the system's functioning, capable of ensuring a stable thermal state of alternative energy sources for heat pump systems during their long-term operation.

Thus, to substantiate the modes of rational use of heat pump systems based on soil energy, groundwater and wastewater, it is necessary to apply a generalized toolkit using mathematical modelling methods, based on determining the operating conditions of the system that do not harm the environment, its schematic and constructive, thermal and operating characteristics, taking into account climatic factors and the regional technical potential of low-potential alternative energy sources (LPAES), which are capable of reliably meeting the needs of consumers with the maximum fossil fuel substitution coefficient.

Thus, the generalized toolkit (GT) for improving heat pump systems (HPS) based on soil energy, groundwater and wastewater should guarantee the effective course of processes in HPS elements during long-term operation without thermal depletion of the LPAES, when selecting SE, GW and SV for the HPS evaporator, which is an urgent scientific and technical problem to which this study is devoted.

The introduction to the dissertation defines the object, the subject, the objectives and the research methods. It presents the scientific novelty and practical significance of the research results; highlights the personal contribution of the applicant.

In the section 1 of the dissertation highlights the principles of effective use of modern energy generation technologies, establishes their advantages and disadvantages. It is shown that for the effective implementation of a heat supply system with rational use of soil energy, groundwater and wastewater in the heat pump systems (HPS) to solve energy saving problems, taking into account regional capabilities and consumer needs, it is necessary to develop a mathematical model that is able to determine rational operating modes of the system that prevent soil freezing - a negative environmental effect that can occur during long-term operation of the HPS.

Therefore, there is a pressing scientific and practical task of increasing the efficiency and reducing thermal pollution of the environment by improving the operating modes of the alternative heat supply system, which ensures an increase in the substitution coefficient of fossil fuels.

Alternative technologies for the climatic conditions of Ukraine are characterized by the presence of the technical potential of soil energy, groundwater and wastewater, which is advisable to utilize in heat pump installations and usefully used for heat supply of heterogeneous consumers. The decision on the feasibility of implementing such an energy supply system is made based on the results of determining the efficiency of heat pump installations, using soil energy, groundwater and wastewater, according to energy, economic, environmental and social factors.

It should be noted that, despite the need for application and numerous studies aimed at the practical implementation of HPS based on soil energy, soil and wastewater for regional conditions, the insufficient effectiveness of currently existing solutions that allow predicting and preventing the phase transformation of moisture in the soil mass around the soil contour of the HPS, i.e. without harmful environmental impact, hinders. To solve this problem, the research proposes a toolkit for improving the operating modes of heterogeneous HPS of energy supply based on soil energy, soil and wastewater, the technical potential of which is determined by regional conditions.

The first point of scientific novelty is formulated, which is as follows: to increase the efficiency of energy supply systems, with the rational use of a heat pump system based on heterogeneous LPAES (soil energy, groundwater and wastewater), it is necessary to propose a toolkit for mathematical modelling of the functioning of HPS using LPAES, taking into account their technical potential and regional climatic conditions, as a means of energy saving, which will lead to beneficial effects: energy (reduce the share of use of traditional primary energy resources) and environmental (reduce thermal damage to the environment) during long-term operation of the specified heat pump systems.

In the section 2 the conditions for rational use of a ground-source heat pump system (GSHPS) for heat supply purposes are substantiated, using the tools for mathematical modelling of non-stationary thermal processes in the GSHPS. Based on the results of

numerical modelling, recommendations have been developed to increase the efficiency and reliability of the GSHP operation without worsening the thermal state of the soil mass around the soil probes during long-term operation of the GSHPs. The proposed tools for non-stationary thermal processes in the soil mass allowed us to increase the accuracy of calculating the cumulative heat coming from the soil to the heat pump evaporator by 1.5 times, taking into account the different intensity of heat removal from the soil along the height of the soil tube. In addition, the conditions for increasing the efficiency of the soil probe by reducing the length of the heat exchange zone with the vapor phase, where the heat exchange intensity is half as much, are substantiated, and the relative specific area of soil probes per 1 m² of heated premises is established.

The second point of scientific novelty is as follows: rational conditions for the functioning of a heat pump system based on soil energy (GSHPs) in heat supply modes have been determined, using the proposed toolkit for mathematical modeling of non-stationary thermal processes in GSHP elements on the basis of energy-saving technologies, taking into account climatic conditions. The schematic, design, technological and operating parameters of the GSHPs have been proposed, which provide environmental benefits of the system due to the prevention of the phase transition state in the soil mass around the soil probes during long-term operation of the heat pump system. The toolkit for non-stationary thermal processes in the soil mass that we have proposed has allowed us to increase the accuracy of the calculation of cumulative heat.

In the section 3, the conditions for the rational use of a ground water heat pump system (GWHPs) for heating and air conditioning are substantiated, using the tools of mathematical modelling of non-stationary thermal processes in GWHPs. Based on the results of numerical modeling, recommendations have been developed to increase the efficiency and reliability of the GWHPs operation in heating and air conditioning modes without harm to the environment, which is ensured by organizing heat regeneration with alternating directions of groundwater flows, namely, when extracting GW heat from the well for heating purposes and discharging GW heat into the well for air conditioning purposes, which stabilizes the thermal state of the soil mass around the well, bringing it

closer to the background, during long-term operation of the heat pump system for a wide range of heat consumers.

The third point of scientific novelty is as follows: rational conditions for the functioning of a ground water heat pump system (GWHS) in heating and air conditioning modes have been determined, using the proposed tools for mathematical modeling of non-stationary thermal processes in GWHS elements on the basis of energy-saving technologies, taking into account climatic conditions. Schematic-constructive, technological and regime GWHSs have been proposed, which provide environmental benefits of the system due to the normalization of the thermal state of the soil mass around the GW well, bringing it closer to the natural temperature field during long-term operation of the heat pump system.

In the section 4, the conditions for the rational use of a heat pump system based on wastewater energy (WWHS) for heat supply purposes are substantiated, using the tools of mathematical modeling of thermal processes in a heat exchanger-evaporator. Based on the results of numerical modeling, the feasibility of using heat pump systems based on industrial and domestic wastewater is substantiated. The methodology we have proposed allows us to determine the efficiency of the heat exchange surfaces of a heat pump system without harm to the environment.

The fourth point of scientific novelty is as follows: a numerical modeling toolkit has been proposed for the effectiveness of using heat pump systems based on industrial and domestic wastewater without harming the environment. Recommendations have been developed for optimizing the parameters of the WWHS evaporators, which ensure the replacement of fossil fuels.

Keywords: mathematical modeling, non-stationary thermal processes, modeling toolkit, phase transformations, thermal state, low-potential energy sources, soil energy, groundwater, wastewater, heat exchangers, heat pump system, cumulative heat, energy efficiency.

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

1. 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. – Available from: DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2024.2-62.10> (*Indexed in SCOPUS*)

2. Denysova A.E., Ivanov P.O. The toolkit of numerical modelling of the operating modes of the geothermal heat pump for heating and cooling with the account of climate conditions // Refrigeration Engineering and Technology, 2026 . – P. 1 – 14. – Available from: <https://journals.ontu.edu.ua/index.php/reftech/article/view/3380>

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

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

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

4. 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. P. 352–362. – Режим доступу: DOI: <https://doi.org/10.15276/hait.06.2023.23>

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

5. Alla Denysova, Svitlana G. Antoshchuk, Pavlo O. Ivanov, Olena O. Arsirii, Anastasiya S. Troynina. Modelling of the temperature field in the soil massive for different operating modes of the ground source heat pump // Applied Aspects of Information Technology. 2024, N7 (3): 242–254. Режим доступу: <https://doi.org/10.15276/aait.07.2024.17>

<https://tests.hait.od.ua/index.php/journal/article/view/15>

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

6. A. Mazurenko, O. Klymchuk, G. Luzhanska, P. Ivanov, I. Sergeiev. Ensuring increased reliability and efficiency of heat supply systems due to the use of microturbines in conditions of unstable power supply// Proceedings of Odessa Polytechnic University, Issue 2(66), 2022 – P.58-63. Режим доступу: DOI: 10.15276/opu.2.66.2022.07

<https://doi.org/10.15276/opu.2.66.2022.07>

<https://pratsi.op.edu.ua/index.php/pratsi/article/view/33/33>

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

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

7. Іванов П.О., Шилов П.О. Ефективність роботи теплового насосу у послідовно- паралельній схемі системи опалення// 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. 751. Режим доступу: <https://ndch.kpi.kharkov.ua/wp-content/uploads/2025/05/Zbirnik-tez-2025.pdf>

8. Іванов П.О., Чабан А.О. Підтримка умов мікроклімату на засадах енергозберігаючих технологій // 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. 750. Режим доступу: <https://ndch.kpi.kharkov.ua/wp-content/uploads/2025/05/Zbirnik-tez-2025.pdf>

9. Денисова А. Є., Іванов П. О. Ексергетична ефективність теплонасосних технологій для когенераційних потреб// Proceedings of XI International conference "Informatics. Culture. Technique". Інноваційні енергетичні технології, Одеса, 16–17 жовтня 2025 р., №2.–С.548–554. <https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.82>

10. Іванов П.О. Методика визначення температури теплоносія на виході з ґрунтового теплообмінника теплонасосної системи // VIII International scientific and practical conference VIII International scientific and practical conference «Scientific Research as a Mechanism of Effective Human Development» (January 31-February 2, 2024) Sofia, Bulgaria, International Scientific Unity. 2024. С.341–344. – Режим доступу: <https://isu-conference.com/wp-content/uploads/2024/03/Scientific-research->

[as-a-mechanism-of-effective-human-development_Jan_31_Feb_2_2024_Sofia_Bulgaria.pdf](#)

11. А.Є.Денисова, П.О.Іванов. Модель нестационарних теплових процесів в ґрунтовій теплонасосній системі // Proceedings of X International conference "Informatics. Culture. Technique". Інноваційні енергетичні технології, 2024, Vol. 1, N1. – P.315–322. DOI: <https://doi.org.10.15276/ict.01.2024.49>

12. Іванов П.О., Мазуренко А.С. Забезпечення ефективності теплонасосної системи // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей XXXII міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2024, 22-25 травня 2024 р. / за ред. проф. Сокола Є.І. – Харків: НТУ «ХПІ». – С. 583. Режим доступу: <https://science.kpi.kharkov.ua/wp-content/uploads/2024/05/Zbirnik-tez-MicroCAD-2024.pdf>

13. Мазуренко А.С., Іванов П.О., Шавров В.В. Перспективи використання води свердловин для теплонасосних систем тепlopостачання // Proceedings of the XVIII International Scientific and Practical Conference “Theoretical and applied aspects of the development of science”. Bilbao, Spain. May 09 – 12, 2023. – С.471-474. Режим доступу: <https://isg-konf.com/uk/theoretical-and-applied-aspects-of-the-development-of-science/>

14. Мазуренко А.С., Лужанська Г.В., Іванов П.О., Гафінчук В.М., Хавара Ю.П. Використання мікротурбін автономного енергозабезпечення в міському та сільському господарстві // II Міжнародна науково-практична конференція “Modern education using the latest technologies”, 17-20 січня 2023 р., Лісабон, Португалія. –С 468– 470. Режим доступу: <https://isg-konf.com/uk/modern-education-using-the-latest-technologies/>