

**Ексергетичне обґрунтування нестационарних режимів та характеристик комбінованого тепло- та холодозабезпечення енергоефективних будівель на основі теплонасосних систем.**

**Exergy analysis of dynamic modes and parameters of heat pump systems providing combined heating and cooling for energy efficient buildings**

1. **Номер державної реєстрації - № 0122U001750.**
2. **Науковий керівник – д.т.н., проф. Волощук В.А., Волощук В.А., Voloshchuk V.A.**
3. **Суть розробки, основні результати**

**(Укр.)** Розроблено та удосконалено методологічне, математичне, алгоритмічне та програмне забезпечення для обґрунтування структури, параметрів, режимів роботи систем тепло- та холодозабезпечення енергоефективних будівель на основі теплонасосних установок з урахуванням нестационарних процесів та на основі методів ексергетичного аналізу. Розроблено та реалізовано новий підхід для кількісного оцінювання термодинамічних втрат, їх вартості, екологічності, інвестиційних затрат та антропогенного впливу, що можна позбутися в компонентах системи, без необхідності введення теоретичних або ідеальних процесів, що передбачається так званим поглибленим ексергетичним аналізом. Розроблено та реалізовано новий підхід для виявлення і кількісного оцінювання можливостей зниження інвестиційної вартості та антропогенного впливу на довкілля в процесі виробництва компонентів системи за рахунок взаємовпливу та підвищення їх термодинамічної ефективності. Розроблено та реалізовано математичні моделі систем тепло- та холодозабезпечення будинків з низьким споживанням енергії на базі досліджуваних теплонасосних установок, методи та засоби реалізації цих моделей з урахуванням запропонованих критеріїв ексергетичного оцінювання та із застосуванням сучасних інформаційних технологій (хмарні розрахунки, цифрові двійники, тощо). Обґрунтовано структури, параметри та режими роботи досліджуваних систем тепло- та холодозабезпечення з урахуванням нестационарних процесів.

**(Eng).** Methodological, mathematical, algorithmic and software maintenance and support services have been developed and improved for optimizing structure, parameters and operation modes of new and improved solutions in cooling and heating systems based on heat pumps taking into account dynamic modes and exergy analysis. A new approach for calculating avoidable parts of exergy destruction, costs and environmental impact within the components of energy conversion systems has been developed and applied without the need to define the ideal state of a component. A new approach aimed at the simultaneous thermodynamic, economic and environmental enhancement of energy conversion systems has been developed and applied taking into account component interactions and thermodynamic enhancement. Mathematical models of heating and cooling systems for energy efficient buildings have been developed and applied, methods and tools for implementing these models have been developed and applied taking into account the developed criteria of exergy analysis and using modern information technologies (cloud calculations, digital twins, etc.). The structures, parameters, and operating modes of the studied heating and cooling systems have been proposed taking into account dynamic modes.

4. **Наявність охоронних документів на об'єкти права інтелектуальної власності:**
  - Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір. № 117812. Динамічні енергетичні моделі експлуатації об'єктів житлового фонду. Дешко Валерій Іванович, Білоус Інна Юріївна, Буяк Надія Андріївна, Бірюков Дмитро Вікторович, Яценко Олена Ігорівна. Дата реєстрації 5 квітня 2023 р.
  - Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір. № 6814. Оцінювання динаміки енергопотребі будівель з урахуванням ексергетичної моделі теплового комфорту, на прикладі будівель масової забудови. Дешко Валерій Іванович, Білоус Інна Юріївна, Буяк Надія Андріївна. Дата реєстрації 13.06.2023.

- Авторське право на твір. № 113266 Науковий твір «Експериментальне дослідження якості повітря та повітрообміну в закладах освіти та житлових будівлях». Дешко В.І., Білоус І.Ю., Виноградов-Салтиков В.О. Дата реєстрації 10 червня 2022
- Авторське право на твір. № 113811 Науковий твір «комп'ютерна програма «Система віддаленого енергомоніторингу КПІ ім. Ігоря Сікорського. Температура»». Новіков П.В., Шевченко О.М. Дата реєстрації 11 липня 2022.
- №r202300331 комп'ютерна програма “Системам віддаленого енергомоніторингу КПІ ім.Ігоря Мікорського. Індивідуальні теплові пункти” Новіков П.В., Шевченко О.М.
- №с202304501 комп'ютерна програма “Ексергетичне діагностування неполадок у компонентах теплового насосу” Волощук В.А., Некрашевич О.В.

## 5. Порівняння зі світовими аналогами

Створені та реалізовані на основі ексергетичного підходу методи, моделі, засоби й алгоритми дослідження систем тепло- та холодозабезпечення як на стадії проектування, так і на стадії експлуатації відповідають світовому рівню наукових досліджень оскільки в теперішній час цей напрям є новим і забезпечує реалізацію принципово нового підходу до створення й управління такими системами – а саме підходу з кількісного оцінювання необоротностей процесів передачі та перетворення енергії та їх зв'язок із економічною та екологічною ефективністю.

Запропоновано новий підхід до розрахунку частин деструкції ексергії, якої можна уникнути в межах k-го компонента системи без необхідності реалізації теоретичних припущень, що застосовуються в існуючому методі поглибленого ексергетичного аналізу і пов'язані з ідеалізацією процесів або компонентів установки.

В рамках подальшого розвитку методології поглибленого ексергоекономічного (exergoeconomic) та ексергоприродничого (exergoenvironmental) аналізу запропоновано новий підхід для оцінювання можливостей зниження інвестиційної вартості та антропогенного впливу на довкілля в процесі виробництва компонентів системи за рахунок взаємовпливу та підвищення їх термодинамічної ефективності.

Нові моделі та алгоритми їх реалізації базуються на запропонованих термодинамічних підходах, а також використовують сучасні засоби (на основі EnergyPlus, MathCad, Maple, Matlab, CoolProp, Refprop, Python, Google Colab) та інформаційні технології (хмарні розрахунки, цифрові двійники, тощо).

## 6. Економічна привабливість для просування на ринок

Впровадження нових схем, обґрунтування параметрів та принципів оперативного керування у сфері тепло- та холодозабезпечення населених пунктів на основі розроблених методів, моделей, алгоритмів, засобів та створеної інформаційної бази дасть можливість майже вдвічі знизити споживання викопних, імпортованих та високоякісних видів палива (зокрема, природного газу), від яких складно відмовитися в інших галузях (хімічна, металургійна, тощо).

## 7. Потенційні користувачі

Отримані в рамках НДР результати можуть використовувати організації та компанії житлово-громадської сфери незалежно від форми власності та комунальні підприємства. У використанні результатів НДР зацікавились: ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій», ГО «Асоціація енергетичних аудиторів України», ТОВ «Едвансіс», СП «Укрінтерм» та інші. Можливим користувачам НДР буде передано інформаційно-аналітичні матеріали щодо розроблених методів й критеріїв; а також комп'ютерні моделі та рекомендації для обґрунтування технічних рішень із тепло- та холодозабезпечення будинків на базі теплонасосних установок із урахуванням підвищення їх ефективності. Результати роботи будуть використанні у формуванні заявок за програмами Європейської комісії («Горизонт Європа», «LIFE»), програми НАТО «Наука заради миру і безпеки» та інші.

## 8. Стан готовності розробки

Розроблено інформаційну базу, що включає в себе методи, алгоритми та розрахункове середовища для обґрунтування структури, параметрів, режимів роботи нових і вдосконалених рішень в системах тепло- та холодозабезпечення населених пунктів на основі методології ексергетичного аналізу.

## 9. Існуючі результати впровадження

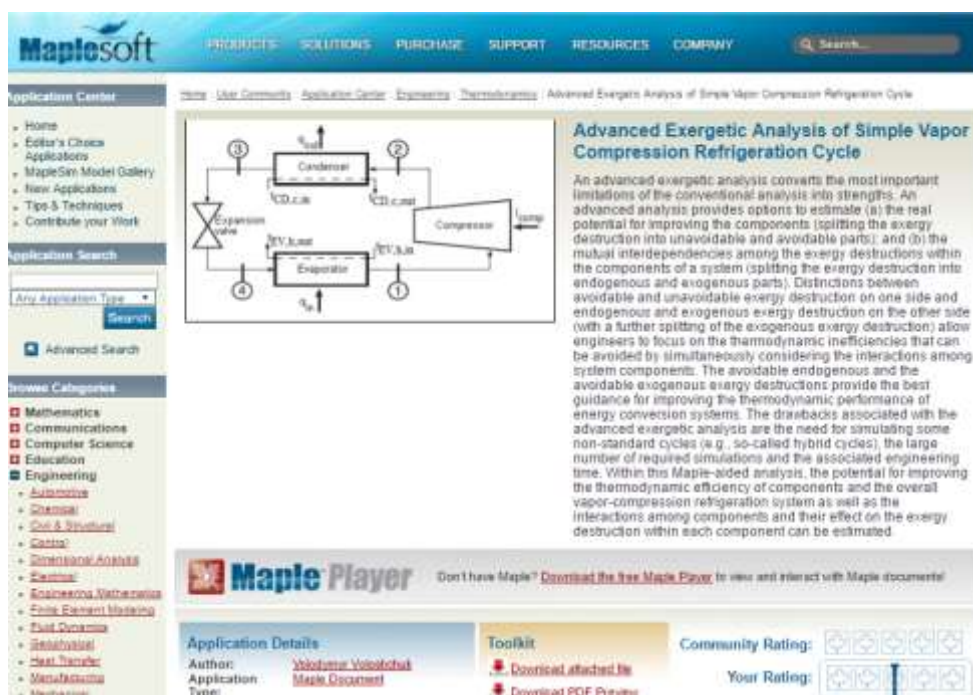
Отримані наукові та науково-практичні результати впроваджено у таких проєктах:

- «Визначення доцільності встановлення припливно-витяжних пристроїв з рекуператорами тепла для житлових будівель»;
- «Аналіз режимів роботи клапана системи охолодження вузла центру обробки даних»;
- «Налаштування швидкості вентилятора під динамічним навантаженням сервера»;
- «Аналіз енергозберігаючих технологій керування параметрами мікроклімату громадського простору типу “коворкінг»;
- «Розроблення інтелектуальної низькотемпературної системи теплозабезпечення будівель на базі конденсаційної модульної котельні»
- «Розкриття трансформативного потенціалу українських університетів для розбудови кліматично нейтральних та сталих міст» («Unlocking the transformative potential of Ukrainian universities towards climate neutral and sustainable cities») за грантової підтримки програми Еразмус+КА2.

## 10. Назва підрозділу

КПІ ім. Ігоря Сікорського, теплоенергетичний факультет, кафедра автоматизації енергетичних систем, 044 204-80-84. [v.voloshchuk@kpi.ua](mailto:v.voloshchuk@kpi.ua).

## 11. Фото (обов'язково)



The screenshot displays the MapleSoft website interface. At the top, there is a navigation menu with links for PRODUCTS, SOLUTIONS, PURCHASE, SUPPORT, RESOURCES, and COMPANY. Below this is a search bar. The main content area features a sidebar on the left with 'Application Center' and 'Browse Categories' (Mathematics, Communications, Computer Science, Education, Engineering, etc.). The central part of the page shows a schematic diagram of a vapor compression refrigeration cycle with four numbered points (1, 2, 3, 4) and labels for Condenser, Compressor, and Evaporator. To the right of the diagram is a text block titled 'Advanced Exergetic Analysis of Simple Vapor Compression Refrigeration Cycle' which describes the analysis process. Below the diagram and text, there is a 'Maple Player' section with a download link. At the bottom, there are sections for 'Application Details' (Author: Volodymyr Voloshchuk, Application: Maple Document), 'Toolkit' (Download attached file, Download PDF Preview), and 'Community Rating' (5 stars).

Рисунок 1 – Копія веб-сторінки <http://www.maplesoft.com/applications/view.aspx?SID=154068> серверу *Maple application center*, де розміщений Марпле-документ з поглибленого ексергетичного аналізу простого термодинамічного циклу парокompресійного теплового насоса

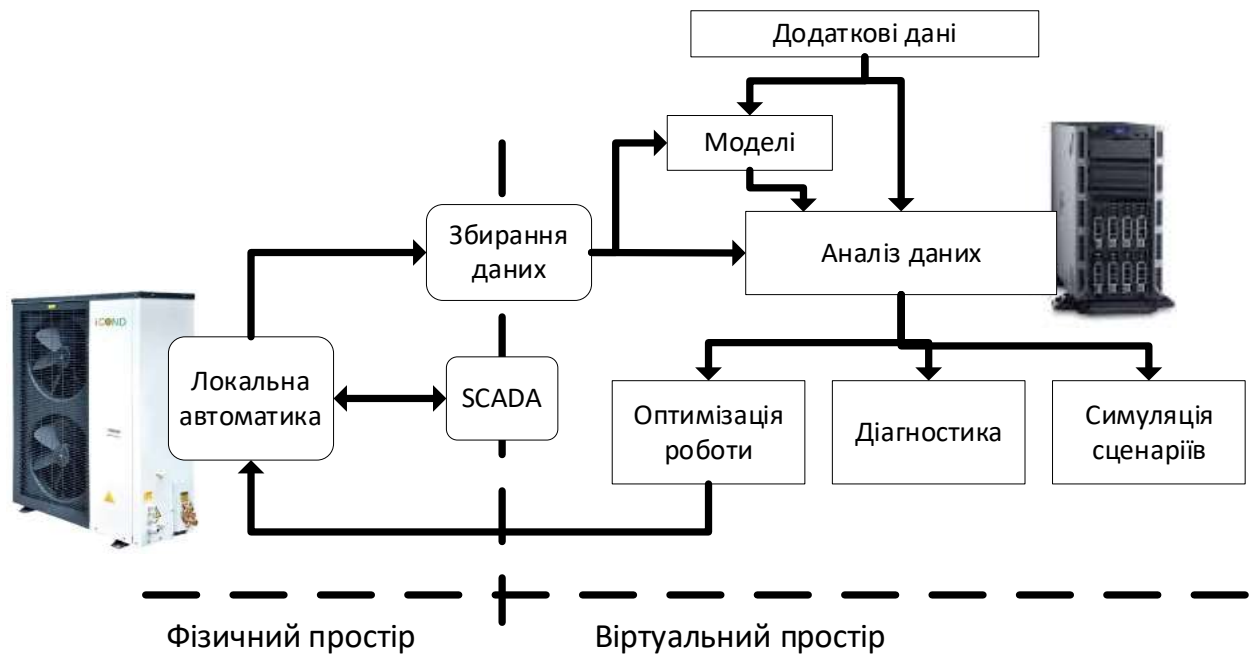


Рисунок 2 – Концепція цифрового двійника ТНУ



Рисунок 3 – Відеокадр цифрового двійника з сервісними параметрами ТНУ

Приклади застосування хмарної платформи colaboratory для моделювання компонентів системи теплозабезпечення:

- [An open source web-based interactive tool for implementation of advanced exergy analysis of a refrigeration machine](#)
- [Exergy analysis of heat pump](#)
- [Ексергетичний аналіз процесу застосування дроселювання пари для регулювання потужності парової трубини](#)
- [Діагностування роботи теплонасосної установки на основі ексергетичного аналізу](#)

## 12. Перелік публікацій за матеріалами досліджень за період виконання

Монографія

МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМІВ СИСТЕМ ТЕПЛОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БУДИНКІВ / В. І. Дешко, В. А. Волощук, І. Ю. Білоус, Н. А. Буюк, Д. В. Бірюков, О. В. Некрашевич – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2023. – 270 с.

Статті:

- 1) Prospects for the Use of Renewable Energy Sources while Increasing the Energy Efficiency Level of Office Buildings to the Level of nZEB Deshko, V., Bilous, I., Buyak, N., Naumchuk, O. *Rocznik Ochrona Srodowiska*, 2023, 25, 148–158. <https://doi.org/10.54740/ros.2023.015>;
- 2) Impact of Heating System Local Control on Energy Consumption in Apartment Buildings. Deshko, V., Bilous, I., Maksymenko, O. *Rocznik Ochrona Srodowiska* 2023, 25, 77–85. <https://doi.org/10.54740/ros.2023.009>;
- 3) V. Deshko, I. Bilous, N. Buyak, A. Sapunov, D. Biriukov. Dynamic interdependence of comfortable thermal conditions and energy efficiency increase in a nursery school building for heating and cooling period. *Energy*, Vol. 129076, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.129076>;
- 4) Voloshchuk, V., Gullo, P. and Nekrashevych, O. (2022) ‘Simultaneous thermodynamic and economic enhancement of heat pumps based on a new method for avoidable irreversibility assessment’, *Int. J. Exergy*, Vol. 38, No. 2, pp.158–175. DOI:10.1504/IJEX.2022.123598;
- 5) Voloshchuk, V., Gullo P, Nikiforovich E. Advanced Exergy Analysis of Ultra-Low GWP Reversible Heat Pumps for Residential Applications. *Energies*. 2023; 16(2):703. <https://doi.org/10.3390/en16020703>;
- 6) Buyak, N., Deshko, V., Bilous, I., Biriukov, D. and Voloshchuk, V. (2023) ‘Applying dynamic energy and exergy analysis to a building envelope’, *Int. J. Exergy*, Vol. X, No. Y, pp.xxx–xxx. (прийнята до друку);
- 7) В.І. Дешко, Н.А. Буяк, І.Ю. Білоус, О.С. Наумчук. ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА ПІДВИЩЕННЯ ТЕПЛООВОГО ЗАХИСТУ ГРОМАДСЬКИХ БУДІВЕЛЬ ДО СУЧАСНИХ ЄВРОПЕЙСЬКИХ ВИМОГ. Науковий журнал «Енергетика: економіка, технології, екологія». №2. 2022. С. 7-18. <https://doi.org/10.20535/1813-5420.2.2022.261277>
- 8) ДЕШКО В.І., БІЛОУС І.Ю., МАКСИМЕНКО О.Е. ВПЛИВ МІСЦЕВОГО ПОКВАРТИРНОГО РЕГУЛЮВАННЯ СИСТЕМ ОПАЛЕННЯ ЖИТЛОВИХ БУДИНКІВ НА ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ. Технології та інжиніринг, № 1(6), 2022. С. 20-31. <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2022.1.2>
- 9) Дешко В.І., Білоус І.Ю., Голубенко О.О. ОЦІНЮВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ШКОЛИ ЗА ДОПОМОГОЮ ДИНАМІЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРИ ЗМІНІ ВИМОГ ДО ТЕПЛООВОГО ЗАХИСТУ. Енергетика та автоматика. №4. 2023. С. 45-59. [http://dx.doi.org/10.31548/energiya4\(68\).2023](http://dx.doi.org/10.31548/energiya4(68).2023).
- 10) Микита Є.О., Дешко В.І., РОЗПОДІЛЬНИЙ ОБЛІК ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ НА ОПАЛЕННЯ БАГАТОКВАРТИРНИХ БУДИНКІВ: ТЕХНІЧНІ, МЕТОДИЧНІ, ПОВЕДІНКОВІ АСПЕКТИ. Енергетика: економіка, технології, екологія. 2023. № 4, с. 38 – 46, <https://doi.org/10.20535/1813-5420.4.2023.290892>
- 11) Дешко В.І., Наумчук О.С., «Аспекти використання nZEB концепції для будівель у центральній та східній Європі» «Технології та інжиніринг» № 1(12), 2023 <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2023.1.4>
- 12) Дешко В. І., Суходуб І. О., Яценко О. І. Дослідження коефіцієнтів ефективності підсистеми тепловіддачі на основі CDF-моделі кімнати. Технології та інжиніринг. №5. 2022. С. 17-26. DOI: 10.30857/2786-5371.2022.5.2 <https://vistnuk.knutd.edu.ua/project/510-2022>
- 13) Дешко В.І., Білоус І.Ю., Гетманчук Г.О. ПАРАМЕТРИЧНИЙ АНАЛІЗ ПРИРОДНОГО ПОВІТРООБМІНУ В БАГАТОКВАРТИРНИХ ЖИТЛОВИХ БУДІВЛЯХ. Науковий журнал «Енергетика: економіка, технології, екологія». №4. 2023. С. 57-68. DOI: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.4.2023.290897>
- 14) Білоус І.Ю., Буяк Н.А, Бірюков Д.В., Яценко О.І., Шкляр В.І, Дубровська В.В.. ЕКСЕРГЕТИЧНІ ТА ЕНЕГЕТИЧНІ ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ В БУДІВЛЯХ. Технології та інжиніринг. - 2023. - № 1 (12). - С. 26-40. <https://er.knutd.edu.ua/handle/123456789/23308>
- 15) Дешко В.І., Білоус І.Ю., Буяк Н.А, Сапунов А.О. ПІДВИЩЕННЯ РІВНЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СПОЖИВАННЯ ЕНЕРГІЇ В ДИТЯЧОМУ САДКУ, ТА ЙОГО ВПЛИВ НА

РІВЕНЬ ТЕПЛООВОГО КОМФОРТУ. Технології та інжиніринг. №2. 2023. С 27-35.  
<https://er.knutd.edu.ua/handle/123456789/23362>

- 16) Некрашевич, О.В.; Волощук, В.А. ЕКСЕРГЕТИЧНЕ ДІАГНОСТУВАННЯ НЕПОЛАДОК У КОМПОНЕНТАХ ТЕПЛООВОГО НАСОСУ У ЗМІННИХ РЕЖИМАХ РОБОТИ. АТВР 2022, 14, 27–34, <https://doi.org/10.15673/atbp.v14i4.2433>.
- 17) Волощук В.А. Дослідження динамічних характеристик теплонасосної установки типу «повітря-вода» [Текст] / В.А. Волощук, О.В. Некрашевич, М.С. Богза, П.В. Гікало // Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки. – 2023. – Т.34(73). – №3. – Ч.1, <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.3.2/07>
- 18) Дешко В.І., Білоус І.Ю., Гетманчук Г.О. ДОСЛІДЖЕННЯ ПОВІТРООБМІНУ В КВАРТИРІ НА ОСНОВІ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ВИЗНАЧЕННЯ МАСОПЕРЕНОСУ СО<sub>2</sub>. Енергетика та автоматика. №3. 2023. С. 28-40. DOI: [http://dx.doi.org/10.31548/energiya3\(67\).2023.028](http://dx.doi.org/10.31548/energiya3(67).2023.028)
- 19) Захарченко А. С., Степанець О. В. Математичне моделювання температурного режиму фанкойла. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2022. № 3 (13). С. 11-17. doi:10.20998/2413-4295.2022.03.02.
- 20) Подстєвая Т.Л., Серєда В.В. «Термодинамічний аналіз відкритої системи термічного знесолення води з підігрівом повітря» Журнал "Енергетика і автоматика", фаховий категорія Б, дата публікації - грудень 2023.
- 21) Серєда В.В., Припула Н.О. Енергетичні показники термічних опріснювальних систем із зволожувачами різних типів. Журнал "Вісник Вінницького політехнічного інституту", фаховий категорія Б, дата публікації - грудень 2023.
- 22) Voloshchuk, V.A.; Nekrashevych, O.V.; Bohza, M.S.; Hikalo, P.V. DYNAMIC CHARACTERISTICS OF AN WATER-SOURCE HEAT-PUMP SYSTEM. Scientific notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. Series: Technical Sciences 2023, 6, 36–44 – (прийнята до публікації).
- 23) V. DESHKO, I. BILOUS, T. BOIKO. INFLUENCE OF HEATING AND VENTILATION MODES ON THE ENERGY CONSUMPTION OF UNIVERSITY EDUCATIONAL BUILDINGS UNDER QUARANTINE CONDITIONS IN UKRAINE. Journal of New Technologies in Environmental Science. №1. 2022. P.36-40.. <https://jntes.tu.kielce.pl/wp-content/uploads/2023/01/INFLUENCE-OF-HEATING-AND-VENTILATION-MODES-ON-THE-ENERGY-CONSUMPTION-OF-UNIVERSITY.pdf>

Праці конференцій:

- 1) Voloshchuk, V.; Gullo, P.; Nikiforovich, E.; Sereda, V. Exergy-Based Analysis of Heat Pump Using Surplus Heat from Data Centre for Medium Sized District Heating and CO<sub>2</sub>/Propane-Based Mixtures. 35th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems ECOS2022 2022, 2115–2125;
- 2) Voloshchuk, V.; Gullo, P.; Nikiforovich, E. Evaluation of Avoidable Exergy Destruction for a Heat Pump Employing CO<sub>2</sub>/Propane-Based Mixtures and Recovering Waste Heat from Data Centre for District Heating. 7th International Conference on Contemporary Problems of Thermal Engineering CPOTE 2022 2022;
- 24) V. Deshko, I. Bilous, I. Sukhodub, N. Buyak, T. Boiko. Energy Generation and Feasibility Evaluation of Installation of Solar Photovoltaic Plant for Public Buildings. RTUCON2022: 2022 IEEE 63rd International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University. Riga Technical University, Centre «Domus Auditorialis». Riga, Latvia, October 10-12, 2022 <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85146223518&origin=resultslist>;
- 25) Voloshchuk V. A. Exergy-based sizing of a R290 air-to-water reversible heat pump for space heating and cooling purposes [Text] / V. Voloshchuk, P. Gullo, O. Stepanetsc, Eu. Nikiforovich // 36th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental

13. **Надати ключові слова до розробки:** тепло- та холодозабезпечення, теплонасосна установка, будинок з низьким споживанням енергії, ексергетичний аналіз, математичне та комп'ютерне моделювання