

Булгаков Олексій Віталійович, асистент кафедри «Електричні станції»; Тел. (+38) 050-280-24-02; E-mail: olexii.bulhakov@khpri.edu.ua, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3244-420X>

Івахнов Андрій Віталійович, асистент кафедри «Електричні станції»; Тел. (+38) 066-029-34-22; E-mail: andrii.ivakhnov@khpri.edu.ua, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8280-0033>

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 2, Харків, Україна, 61002

Литвинов Олег Михайлович, генеральний директор; Тел. (+38) 093-523-60-19; E-mail: i@bilux.ua, ORCID: <http://orcid.org/0009-0000-0816-5035>

ТОВ «Білюкс»

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИЙ АНАЛІЗ СИСТЕМИ ДОВГОХВИЛЬОВОГО ІНФРАЧЕРВОНОГО ОПАЛЕННЯ В РІЗНИХ ТИПАХ БУДІВЕЛЬ

Анотація. У роботі представлено розрахунок витрат енергії на опалення будівель з трьома різними системами опалення, з метою визначення доцільності використання довгохвильових променевих обігрівачів. У якості методики розрахунку було використано діючі правила енергетичної сертифікації будівель та супутні державні стандарти України. Проведено техніко-економічний аналіз, завдяки якому визначено економію від переходу на променеву систему опалення в житлових, громадських та виробничих будівлях, які знаходяться в однаковому погодному середовищі. Досліджено та надано оцінку доцільності систем променевого опалення за рамками звичної сфери використання, а саме в житлових будівлях, які складають більшу частину всіх опалювальних споруд в Україні, та малих архітектурних формах, таких як, наприклад, модульні будівлі закладів роздрібної торгівлі, громадського харчування тощо. У якості головної дослідної системи були обрані електричні інфрачервоні довгохвильові обігрівачі. Конкуруючими системами є водяна двотрубна система з вільнообтічними радіаторами та електричні стінові конвектори. Визначено ключову відмінність між традиційними водяними системами опалення, з точки зору розрахунку енергоспоживання, яка полягає у відсутності втрат на трубопроводах. Обґрунтовано, що системи променевого опалення більш доцільні у будівлях із висотою поверхів понад 4 метри. Доведено що у будівлях меншого об'єму, скорочення витрат також доволі значне.

Ключові слова: променеве опалення; електричне опалення; технічний та економічний аналіз; модель теплоспоживання; модель електроспоживання.

Bulhakov Olexii, Assistant of the Department "Power Plants"; Tel. (+38)050-280-24-02; E-mail: olexii.bulhakov@khpri.edu.ua, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3244-420X>

Ivakhnov Andrii, Assistant of the Department "Power Plants"; Tel. (+38)066-029-34-22; E-mail: andrii.ivakhnov@khpri.edu.ua, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8280-0033>

National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kyrpychova Str., 2, Kharkiv, Ukraine, 61002.

Lytvynov Oleg, CEO, Tel. (+38)0935236019; E-mail: i@bilux.ua, ORCID: <http://orcid.org/0009-0000-0816-5035>
Bilux LLC

TECHNICAL AND ECONOMIC ANALYSIS OF THE SYSTEM LONG-WAVE INFRARED HEATING IN DIFFERENT TYPES OF BUILDINGS

Abstract. The paper presents the calculation of energy costs for heating buildings with three different heating systems, in order to determine the feasibility of using long-wave radiant heaters. The current rules of energy certification of buildings and related state standards of Ukraine were used as the calculation method. A technical and economic analysis was carried out, thanks to which savings from the transition to a radiant heating system in residential, public and industrial buildings located in the same weather environment were determined. The feasibility of radiant heating systems beyond the usual scope of use, namely in residential buildings, which make up the majority of all heating structures in Ukraine, and small architectural forms, such as, for example, modular buildings of retail establishments, public catering, etc., has been studied and provided. Bilux electric infrared long-wave heaters were chosen as the main research system. Competing systems are a water two-pipe system with free-flowing radiators and electric wall convectors. The key difference between traditional water heating systems, from the point of view of calculating energy consumption, is determined, which is the absence of losses in pipelines. It is justified that radiant heating systems are more appropriate in buildings with a floor height of

more than 4 meters. It has been proven that in buildings of smaller volume, the cost reduction is also quite significant.

Keywords: radiant heating; electric heating; technical and economic analysis; heat consumption model; power consumption model.

Вступ. Україна є країною зі значним споживанням енергії, і будівлі, включаючи житлові та комерційні об'єкти, відіграють важливу роль у загальному енергобалансі країни [1]. Згідно з офіційними даними, витрати енергії на опалення українських будівель склали значну частку в загальному енергоспоживанні країни. Особливо велике значення це набуло після повномасштабних військових дій на території України.

Виялові відключення енергопостачання житлового фонду ледве могли компенсувати дефіцити виробничих та розподільчих потужностей, і під загрозу [2,3] знеструмлення потрапляли навіть споживачі першої категорії.

На початку 2021 року, близько 40% енергії в Україні споживалося у житловому секторі, включаючи енергію, яка використовувалася для опалення будинків [4,5]. Це пов'язано з тим, що багато будівель в країні мають застарілу і неефективну систему опалення. Зокрема, багато будинків ще використовують вугілля та природний газ як основне джерело опалення.

Також, не слід забувати про важливість проблем, пов'язаних зі змінами клімату. Будь-яке нове будівництво або реконструкція сьогодні неможливі без детальної оцінки енергетичної ефективності та використання усіх можливостей по скороченню споживання та викидів вуглецю [6]. Аналіз, проведений Coalition for Urban Transitions, свідчить про те, що потенціал скорочення викидів у великих містах дорівнює 90%, з яких більше половини припадає на викиди будівель та їх інженерних систем (рис. 1).



Рис. 1. Розподілення викидів вуглецю між сферами міської інфраструктури.

В контексті розвитку відновлювальних джерел енергії та сталого розвитку енергетики, одним із важливих пунктів є всебічна електрифікація

технологічних процесів, і будівлі не є виключеннями. Електрифіковані рішення часто є більш ефективними за своєю суттю, і електрифікація майже завжди можлива як при створенні нових систем, так і при модернізації вже існуючих.

Мета статті. Серед різноманіття технічних рішень електричних систем опалення, особливе місце займають стельові випромінюючі панелі. І хоча немає якихось обмежень щодо сфери їх застосування, найбільшу популярність вони отримали у будівлях великого об'єму, таких як комерційні приміщення, спортивні споруди, промислові об'єкти тощо. Променева природа їх тепловіддачі дає можливість скоротити до мінімуму перевитрати енергії, викликані рухом повітря та нерівномірністю розподілення температури в опалювальному об'ємі, особливо, коли висота стелі в приміщеннях дорівнює 4 метри та вище [3,5,7,8].

Метою даної роботи є дослідити та оцінити доцільність систем променевого опалення за рамками звичної сфери використання, а саме в житлових будівлях, які складають більшу частину всіх опалювальних споруд в Україні, та малих архітектурних формах, таких як, наприклад, модульні будівлі закладів роздрібною торгівлі, громадського харчування тощо. У якості головної дослідної системи були обрані електричні інфрачервоні довгохвильові обігрівачі торгової марки «Білюкс» [9]. Конкуруючими системами є водяна двотрубна система з вільнообтічними радіаторами та електричні стінові конвектори. Об'єктами теплотехнічного розрахунку були прийняті три будівлі:

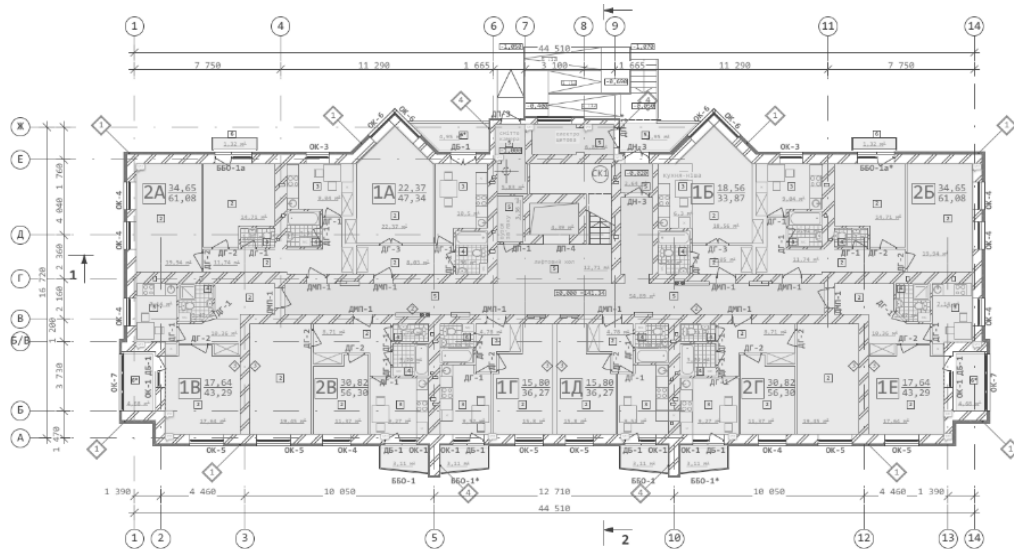
- 1) типова житлова 9-ти поверхівка, проєкту 2020 року,
- 2) окремо розташований ресторан модульної збірної конструкції,
- 3) будівля великого логістичного центру каркасної конструкції.

Плани типових поверхів трьох будівель зображені на рис. 2.

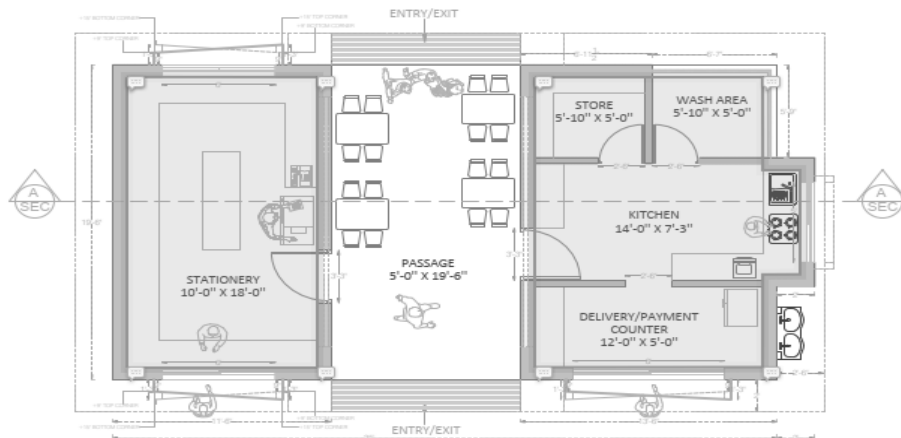
Ідентифікація моделі. Розрахунок витрат на опалення був виконаний за методикою ДСТУ Б А.2.2-12:2015 «Енергетична ефективність будівель. Метод розрахунку енергоспоживання при опаленні, охолодженні, вентиляції, освітленні та гарячому водопостачанні», саме за цим стандартом зараз відбувається енергетична сертифікація будівель, і розробка розділу «Енергоефективність» у складі проектно-кошторисної документації на новобудови.

Енергетичний баланс поділяється на енергетичний або тепловий баланс рівня будівлі (далі енергопотреба) та енергетичний баланс на рівні систем (далі енергоспоживання). Енергопотреба для всіх розглянутих випадків буде незмінною для кожної будівлі [10], і включає наступні складові:

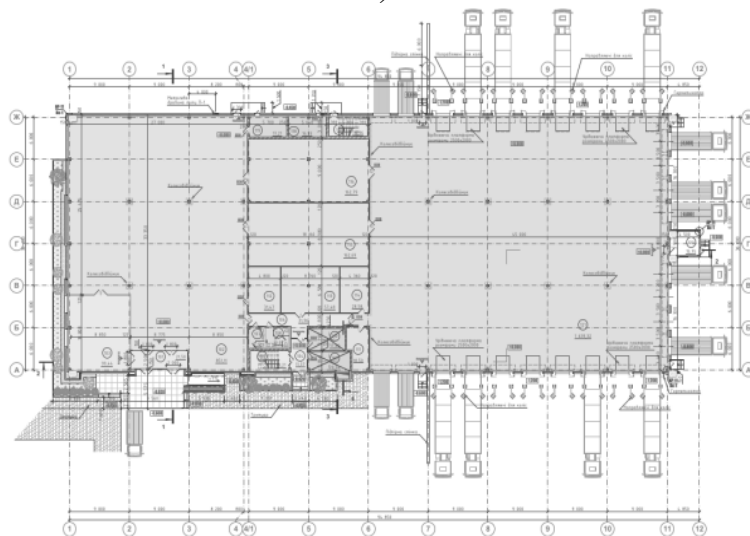
а) трансмісійну теплопередачу між кондиціонованим об'ємом та зовнішнім навколишнім середовищем, що обумовлена різницею між температурою кондиціонованої зони та температурою зовнішнього повітря;



а)



б)



в)

Рис. 2. Плани типових поверхів досліджених будівель: а) житлова будівля, б) ресторан, в) логістичний центр.

б) вентиляційну теплопередачу (від природної вентиляції або системи механічної вентиляції), спричинену різницею між температурою кондиціонованої зони та температурою припливного повітря;

с) внутрішні теплонадходження (включаючи від'ємні надходження від тепловідводу) від людей, устаткування, освітлення та теплота, що виділена або поглинута з систем опалення, охолодження, ГВП, вентиляції тощо;

д) сонячні теплонадходження (які можуть бути прямими, наприклад, через вікна, або непрямими, наприклад, поглинені непрозорими елементами будівлі);

е) акумульовану теплоту в будівлі або вивільнений запас теплоти з масиву будівлі;

Загалом, для кожної будівлі енергопотреба була розрахована без значних відхилень від методики, за винятком врахування вентиляційної теплопередачі.

Для спрощення та приведення розрахунків будівель із різним функціональним призначенням до однакових умов, було прийнято, що вентиляційні втрати складаються лише з інфільтрації, тобто витрат повітряного потоку через пасивні припливні отвори або вікна (природна вентиляція) $q_{ve,inf,mn}$ розрахованого по формулі 1.

$$q_{ve,inf,mn} = n_{inf,mn} \cdot V, \quad (1)$$

де $n_{inf,mn}$ – кратність повітрообміну за рахунок інфільтрації, V – кондиціонований об'єм зони/будівлі, m^3 .

Вплив механічної вентиляції, $год^{-1}$, розрахуємо по формулі 2:

$$n_{inf,mn} = \frac{n_{50} e}{1 + \frac{f}{e} \left(\frac{i}{V n_{50}} \right)}, \quad (2)$$

де e, f – коефіцієнти вітрозахисту, що характеризують вітрозахисні властивості місцевості; n_{50} – кратність повітрообміну будівлі за рахунок інфільтрації при різниці тиску 50 Па, $год^{-1}$, що визначають за результатами випробувань Blower Door Test; i – витрата припливного повітряного потоку при механічній вентиляції, $m^3/год$; i' – витрата витяжного повітряного потоку при механічній вентиляції, $m^3/год$.

Результати розрахунку енергопотреби для трьох будівель для кожного місяця представлені в табл. 1.

Енергопотреба трьох досліджених будівель

	Багатоповерхівка	Ресторан	Логістичний центр
$Q_{H,nd,1}$	54146130	1533513	60107685
$Q_{H,nd,2}$	42163117	1170295	48935754
$Q_{H,nd,3}$	27603349	816454	36972581
$Q_{H,nd,4}$	3090714	261997	12340101
$Q_{H,nd,5}$	853	30170	1126192
$Q_{H,nd,6}$	0	95	705
$Q_{H,nd,7}$	0	0	0
$Q_{H,nd,8}$	0	0	0
$Q_{H,nd,9}$	7235	46890	1799934
$Q_{H,nd,10}$	8659943	399856	17222248
$Q_{H,nd,11}$	31818597	965093	37832996
$Q_{H,nd,12}$	48466759	1405982	54166276
$Q_{H,nd}$	215957	6630	270504

На рівні систем енергетичний баланс на опалення та охолодження, за необхідності, включає:

- енергопотребу для опалення будівлі;
- енергію, що надходить до систем опалення та охолодження;
- генерування, акумулювання, розподілення, тепловіддачу та регулювання втрат систем опалення.

Саме врахування цих факторів впливу відповідає за оцінку ефективності різних інженерних систем, у тому числі для опалення будівлі.

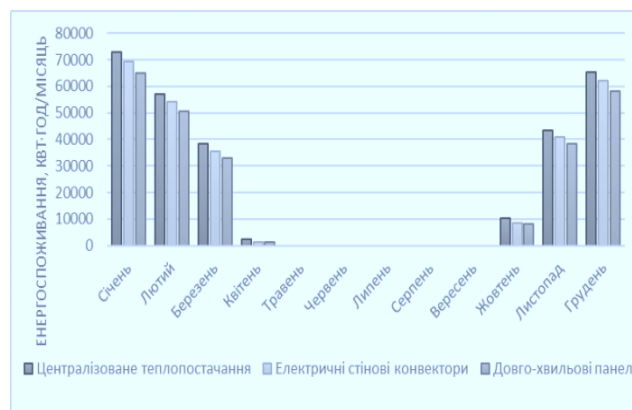
В рамках методики, різниця між типами систем опалення, включена в комплекс поправочних коефіцієнтів, загальний вплив яких на загальні тепловтрати підсистеми тепловіддачі/виділення за конкретний місяць ($Q_{H,em,ls,i}$), кВт · год, розраховуються за формулами 3 і 4.

$$Q_{H,em,ls,i} = \left(\frac{f_{hydr} \cdot f_{im} \cdot f_{rad}}{\eta_{em}} - 1 \right) \cdot Q_{H,em,out} \quad (3)$$

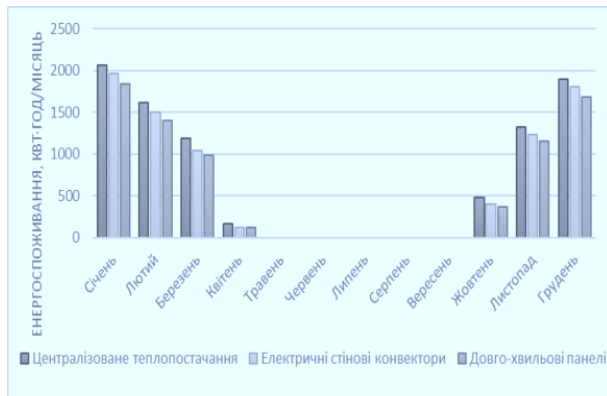
де f_{hydr} – коефіцієнт, що враховує гідравлічне налагодження системи; f_{im} – коефіцієнт, що враховує застосування періодичного теплового режиму

приміщення; $f_{im} = 1$ для постійного теплового режиму; f_{rad} – коефіцієнт, що враховує променеву складову теплового потоку (тільки для промислових систем опалення); $Q_{H,em,out}$ – теплота, яку необхідно подати до кондиціонованого об’єму для підтримки температури упродовж визначеного періоду часу, без урахування інженерних систем теплозабезпечення будівлі, кВт·год визначається згідно з підпунктом 7.2.1 розділу 7 ДСТУ Б А.2.2-12; η_{em} – загальний рівень ефективності для тепловіддавальної складової системи у приміщенні розраховується за формулою 4:

$$\eta_{em} = \frac{1}{(4 - (\eta_{str} + \eta_{ctr} + \eta_{emb}))} \quad (4)$$



а)



б)



в)

Рис. 3. Результати визначення енергоспоживання: а) житлова будівля, б) ресторан, в) логістичний центр.

де η_{str} – складова загального рівня ефективності, яка враховує вертикальний профіль температури повітря приміщення; η_{ctr} – складова загального рівня ефективності, яка враховує регулювання температури

приміщення; η_{emb} – складова загального рівня ефективності, яка враховує питомі втрати зовнішніх огорожень.

Висновки. Розрахунки проведеного дослідження показали, що економічна привабливість промислових систем опалення значуща навіть за межами звичних сфер застосування. Ключова відмінність між традиційними водяними системами опалення, з точки зору розрахунку енергоспоживання, полягає у відсутності втрат на трубопроводах. Річні показники економії приведені в табл. 2.

Таблиця 2

Енергоспоживання трьох досліджених будівель

	Висота кондиціонованого об'єму, м	Централізована теплопостачання, кВт · год	Електричні стінові конвектори, кВт · год	Довгочасові панелі, кВт · год	Економія 3 проти 1	Економія 3 проти 2
<i>Багатоповерхівка</i>	3	289976	271841	254443	12,25%	6,40%
<i>Ресторан</i>	2,75	8732	8073	7556	13,46%	6,40%
<i>Логістичний центр</i>	8	352794	322400	254466	27,87%	21,07%

Із табл. 2 можна побачити підтвердження того, що системи промислового опалення більш доцільні у будівлях із висотою поверхів понад 4 метри, але також видно, що у будівлях меншого об'єму, скорочення витрат також доволі значна.

Оскільки в системах електроопалення підбір перерізу кабелів здійснюється таким чином, щоб уникнути надлишкового нагрівання, тепловтратами на електричних кабелях можна знехтувати.

Побудована в рамках роботи модель може бути використана для техніко-економічного порівняння будь-яких інших інженерних систем в рамках однієї будівлі.

Список використаної літератури:

1. Про затвердження Методики визначення енергетичної ефективності будівель. 2018. Дата звернення: 30.07.2023. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/z0822-18>
2. Maslak O., Grishko N., and Bezruchko O. Undeveloped competitive opportunities of enterprises using in cyclical development conditions. *Economic Annals-XXI*. 2015. vol. 1. P. 43–46.
3. Maslak O. I., Ishchenko S. V., Grishko N. Ye., and Maslak M. V. Export-Oriented Enterprise Development of the Electrotechnical Industry: Strategic Guidelines. In *2019 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*. 2019. P. 486–489. doi: 10.1109/MEES.2019.8896494.

4. Malaguti V., Lodi C., and Tartarini P. Dynamic Analysis of the Role of Thermal Inertia in the Heating System Control of Historical and Monumental Buildings. *Tec. Ital.-Ital. J. Eng. Sci.* 2019. vol. 63. P. 323–328. doi: 10.18280/ti-ijes.632-430.

5. Alessio G., De Carli M., Zarrella A., and Di Bella A. Efficiency in Heating Operation of Low-Temperature Radiant Systems Working under Dynamic Conditions in Different Kinds of Buildings. *Appl. Sci.* 2018. vol. 8. P. 2399. doi: 10.3390/app8122399.

6. Shahan C. 7 Challenges for Global Energy Transformation — Rocky Mountain Institute Report. CleanTechnica. 2019. URL: <https://cleantechnica.com/2019/12/19/7-challenges-for-global-energy-transformation-rocky-mountain-institute-report/> (accessed Jun. 30, 2023).

7. Bulhakov O. and Makhotilo K. Electricity Consumption Model of Domestic Air-to-Water Heat Pumps in Relative Parameters. In *2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. Sep. 2021. P. 502–505. doi: 10.1109/KhPIWeek53812.2021.9569999.

8. Булгаков О. В. Роль теплової інерції в променевих системах опалення. Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я. Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків 2023. С. 98.

9. Каталог обігрівачів Bilux Україна, Bilux - переворот в опаленні. URL: <https://bilux.ua/ua/obigrivachi-dlya-dachi/> (дата звернення 30.07.2023).

10. Булгаков О. В., Немировський І. А. Визначення витрат теплової енергії будівлею з урахуванням змінного добового графіку внутрішньої температури. 2018. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/48622> (дата звернення 30.07.2023)

References:

1. About the approval of the Methodology for determining the energy efficiency of buildings. 2018. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/go/z0822-18> (accessed Jun. 30, 2023).

2. Maslak O., Grishko N., and Bezruchko O. Undeveloped competitive opportunities of enterprises using in cyclical development conditions. *Economic Annals-XXI*. 2015. vol. 1. P. 43–46.

3. Maslak O. I., Ishchenko S. V., Grishko N. Ye., and Maslak M. V. Export-Oriented Enterprise Development of the Electrotechnical Industry: Strategic Guidelines. In *2019 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*. 2019. P. 486–489. doi: 10.1109/MEES.2019.8896494.

4. Malaguti V., Lodi C., and Tartarini P. Dynamic Analysis of the Role of Thermal Inertia in the Heating System Control of Historical and Monumental Buildings. *Tec. Ital.-Ital. J. Eng. Sci.* 2019. vol. 63. P. 323–328. doi: 10.18280/ti-ijes.632-430.

5. Alessio G., De Carli M., Zarrella A., and Di Bella A. Efficiency in Heating Operation of Low-Temperature Radiant Systems Working under Dynamic Conditions in Different Kinds of Buildings. *Appl. Sci.* 2018. vol. 8. P. 2399. doi: 10.3390/app8122399.

6. Shahan C. 7 Challenges for Global Energy Transformation — Rocky Mountain Institute Report. CleanTechnica. 2019. Available at: <https://cleantechnica.com/2019/12/19/7-challenges-for-global-energy-transformation-rocky-mountain-institute-report/> (accessed Jun. 30, 2023).

7. Bulhakov O. and Makhotilo K. Electricity Consumption Model of Domestic Air-to-Water Heat Pumps in Relative Parameters. In *2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. Sep. 2021. P. 502–505. doi: 10.1109/KhPIWeek53812.2021.9569999.

8. Bulhakov O. The role of thermal inertia in radiant heating systems. *Information technologies: science, engineering, technology, education, health*. National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv 2023, p. 98.

9. Catalog of heaters · Bilux Ukraine. Bilux - a revolution in heating. Available at: <https://bilux.ua/ua/obigrivachi-dlya-dachi/> (accessed Jun. 30, 2023).

10. Bulhakov O. and Nemirovsky I. Determination of heat energy costs by the building taking into account the variable daily schedule of internal temperature. 2018. Available at: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/48622> (accessed Jun. 30, 2023).

Надійшла до редакції 28.04.2023 р.