

АНАЛІЗ ЗМІНИ ТЕПЛОВІДДАЧІ РАДІАТОРІВ ВНАСЛІДОК ПЕРЕХОДУ ДО НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНОГО ОПАЛЕННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ ГЕОТЕРМАЛЬНОЇ ЕНЕРГІЇ

Отримано 06 груд. 2024 р.; рекомендовано до публікації 14 бер. 2025 р.
Доступно онлайн 01 квіт. 2025 р.

Лисак О. В.

Автор для кореспонденції: Лисак Олег,
e-mail: oleg.v.lysak@gmail.com

канд. техн. наук
<https://orcid.org/0000-0002-4934-0685>

Інститут відновлюваної енергетики НАН
України, м. Київ, Україна

Абстракт. У статті розглянуто вплив зміни температурного режиму системи опалення на тепловіддачу радіаторів водяної системи опалення будівлі. Цей вплив відбувається внаслідок переходу від високотемпературної системи опалення з використанням викопного палива до низькотемпературної геотермальної системи. Було розглянуто схему роботи геотермальних систем опалення та виконано їх порівняння зі схемою роботи в разі використання викопного палива на прикладі природного газу. Проаналізовано температурні режими системи водяного опалення та виявлено значні відмінності у підходах до визначення температурних режимів. Розглянуто рівняння для визначення тепловіддачі радіатора водяної системи опалення будівлі. Виявлено, що зараз актуальності набирає перегляд формули для перерахунку тепловіддачі радіатора: замість номінального значення використовують фактичне з метою підвищення точності визначення тепловіддачі радіатора шляхом врахування зміни кількості теплоносія (води), що проходить через радіатор. Проведено аналіз зміни тепловіддачі з урахуванням впливу середньої логарифмічної різниці температур між температурою теплоносія в радіаторі та температурою повітря в приміщенні. Отримано характеристики зменшення тепловіддачі від радіаторів. Значення цієї характеристики було порівняно з можливим рівнем зниження тепловтрат приміщення внаслідок термомодернізації житлової будівлі в м. Києві. В результаті було показано, що наразі лише геотермальні системи опалення, що використовують середній температурний режим, зможуть забезпечити необхідну тепловіддачу до приміщення за умови його термомодернізації відповідно до чинних норм. В свою чергу низькотемпературні геотермальні системи опалення потребуватимуть значно більшого зниження тепловтрат приміщення або альтернативних рішень, спрямованих на підвищення тепловіддачі від радіаторів: або заміни їх на такі, що здатні забезпечити необхідну тепловіддачу, або влаштування вентиляторів для їх обдування та подальшого підвищення тепловіддачі.

Ключові слова: геотермальне теплопостачання, низькотемпературне опалення, радіатор, тепловіддача.

ANALYSIS OF CHANGES IN HEAT OUTPUT FROM RADIATORS DURING THE SWITCH TO LOW-TEMPERATURE HEATING USING GEOTHERMAL ENERGY

Received Dec. 06, 2024; accepted Mar. 14, 2025
Available online Apr. 01, 2025

Lysak O.

Author for correspondence: Lysak Oleh,
e-mail: oleg.v.lysak@gmail.com

Cand. of Tech. Science
<https://orcid.org/0000-0002-4934-0685>

Institute of Renewable Energy of the NAS of
Ukraine, Kyiv, Ukraine

Abstract. The article considers the influence of changes in the temperature mode of the heating system on the heat output from radiators of the water heating system of a building. This influence is considered in the transition from a high-temperature heating system using fossil fuels to a low-temperature geothermal system. The scheme of operation of geothermal heating systems is considered and compared with the scheme of operation using fossil fuels on the example of natural gas. The temperature modes of the water heating system are analysed and significant differences in approaches to determining temperature modes are revealed.

The equation for determining the heat output of a radiator of a water heating system of a building is considered. It has been found that it is now important to revise the equation for recalculating the heat output of a radiator from the nominal value to the actual value in order to increase the accuracy of determining the heat output of a radiator by taking into account changes in the amount of heating medium (water) passing through the radiator. An analysis of the change in heat output was carried out, taking into account the influence of the average logarithmic temperature difference between the temperature of the heat medium in the radiator and the temperature of the room air temperature. The characteristics of heat output reduction from radiators were obtained. The value of this characteristic was compared with the possible level of heat loss reduction in a room in the case of thermal modernisation of a residential building in Kyiv. As a result, it was shown that currently only geothermal heating systems using medium temperature conditions can provide the necessary heat output to the premises, provided that they are thermally modernised in accordance with current standards. In turn, low-temperature geothermal heating systems will require a much greater reduction in heat loss from the room, or alternative solutions aimed at increasing heat output from radiators: either by replacing them with those capable of providing the required heat output, or by installing fans to blow them and further increase heat output.

Keywords: geothermal heating, low-temperature heating, radiator, heat output.

Вступ

Сьогодні важливого значення набуває створення енергоефективних систем опалення з метою зниження поточних витрат споживачів на їх роботу, а також зменшення викидів парникових газів. Наразі основним напрямом розвитку таких систем є перехід на низькотемпературне опалення, для якого, зокрема, використовують геотермальні джерела енергії [1, 2]. Зниження температурного режиму таких систем дозволяє підвищити рівень ефективності використання теплового насосу [3–5]. Однак якщо йдеться про забезпечення роботи систем опалення у вже існуючих будинках, потрібно враховувати, що такі системи здебільшого не придатні для безпосереднього використання теплоносія низької температури: навіть в разі термомодернізації будівлі та зниження потреби у тепловіддачі від приладів, зниження теплового потоку від них може виявитись ще істотнішим [3]. Це пов'язано з тим, що системи опалення будівель прилаштовувались до застосування викопного палива і температуру теплоносія в них вибирали максимально високою з метою економії сталі й чавуну, з яких виготовляли елементи системи водяного опалення [6]. Однак початкове високе значення температури призводить до того, що зі значним її зниженням так само знизиться й тепловіддача від опалювального приладу.

Отже, перехід на низькотемпературну геотермальну систему опалення потребує уточнення параметрів коригування тепловіддачі, оскільки раніше методи визначення тепловіддачі були зосереджені саме на високотемпературних системах [7], тож значну увагу приділяли такому розповсюдженому типу опалювальних приладів, як радіатор [3].

Мета та задачі

Метою роботи є аналіз зміни тепловіддачі радіатора водяної системи опалення внаслідок переходу з високотемпературної системи опалення з використанням викопного палива на низькотемпературну геотермальну

систему опалення. Для досягнення мети поставлено такі задачі:

- обґрунтувати вибір розрахункових температур для систем водяного опалення залежно від їх джерела теплопостачання;
- проаналізувати зміну тепловіддачі радіатора через зниження температури теплоносія;
- оцінити необхідність заміни наявних радіаторів у разі переходу на низькотемпературну геотермальну систему опалення з одночасною термомодернізацією будівлі.

Обґрунтування вибору розрахункових температур для систем водяного опалення залежно від їх джерела теплопостачання

У цій роботі розглядатиметься застосування двотрубних систем водяного опалення як таких, що забезпечують якісніше регулювання роботи системи опалення [6].

Традиційно в умовах України розрахунок систем двотрубного водяного опалення з використанням викопного палива, наприклад природного газу (рис. 1, а), базувався на розрахунковому значенні температур на вході до радіатора системи водяного опалення $t_{\text{вх}} = 90^\circ\text{C}$ й температурі у зворотному трубопроводі $t_{\text{вих}} = 70^\circ\text{C}$ [6]. Далі значення температурного режиму будуть записані як 90/70 °C, зниження температури теплоносія на вході до радіатора для цього розрахунку прийнято несуттєвим. Проте 90/70 °C не завжди є типовим вибором: у прикладі з [8] для побудованих ще в 1930-ті роки будівель у Данії використовували саме такий температурний режим, але в прикладі [3] з Німеччини використовували температурний режим 80/65 °C.

Щодо геотермальних систем теплопостачання (рис. 1, б), то в [9] було представлено такі три режими перепаду температури теплоносія систем централізованого опалення: з середнім температурним режимом 70/40 °C; з низькотемпературним режимом, 55/25 °C; з

наднизьким температурним режимом (без означення конкретної температури, але за наявності додаткових нагрівачів). Проте зниження температури може загрожувати безпеці системи з погляду санітарно-гігієнічних

норм, зокрема через формування в ній небезпечних для здоров'я людини бактерій [9], хоча таке зниження підвищує енергетичну ефективність системи геотермального опалення [4, 10].

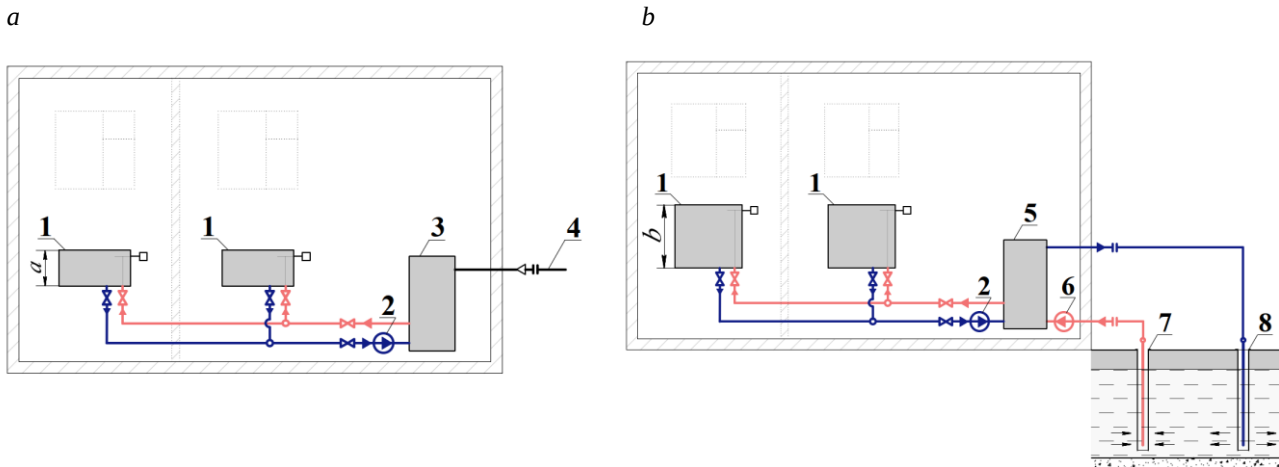


Рис. 1. Принципові схеми систем опалення в разі використання (а) високотемпературної системи опалення (на прикладі системи газового опалення) і (б) низькотемпературної геотермальної системи опалення із застосуванням теплового насоса (на прикладі використання водоносного горизонту як джерела теплоти): 1 – радіатор системи водяного опалення з вбудованим терморегулятором (висота радіаторів залежить від температурного режиму системи водяного опалення); 2 – циркуляційний насос системи водяного опалення; 3 – газовий котел; 4 – газопровід; 5 – тепловий насос; 6 – насос для подавання води зі свердловини до теплового насоса; 7 – свердловина для подавання води з водоносного горизонту; 8 – свердловина для повернення води до водоносного горизонту.

Fig. 1. Schematic diagrams of heating systems using (a) the high temperature heating system (in the example of a gas heating system) and (b) the low temperature geothermal heating system using a heat pump (in the example using an aquifer as a heat source): 1 – radiator of the water heating system with a built-in thermostat (a, b – different heights of radiators depending on the temperature regime of the water heating system); 2 – circulation pump of a water heating system; 3 – gas boiler; 4 – gas pipeline; 5 – heat pump; 6 – pump for supplying water from a borehole to a heat pump; 7 – water supply borehole from the aquifer; 8 – water return borehole to the aquifer.

Іншим важливим фактором є перепад температури теплоносія в радіаторах. Вищенаведена [9] суттєва різниця температур для вибраного температурного режиму в:

$$\Delta t_{dif} = t_{ex} - t_{vux} = 55 - 25 = 30^\circ\text{C}, \quad (1)$$

в низькотемпературних геотермальних системах теплопостачання трапляється не завжди. Наприклад, в [8] розглядався перехід на температурний режим 50/27 °C за $\Delta t_{dif} = 23^\circ\text{C}$; в [10] – температурний режим 55/31,3 °C за $\Delta t_{dif} = 21,7^\circ\text{C}$. В [3] було наведено такі діапазони температурного режиму: за $\Delta t_{dif} = 20^\circ\text{C}$ – 90/70 °C та 80/60 °C; за $\Delta t_{dif} = 15^\circ\text{C}$ з кроком в 5 °C: від 75/60 °C до 65/60 °C; за $\Delta t_{dif} = 10^\circ\text{C}$ з кроком в 5 °C: від 60/50 °C до 40/30 °C. Загалом кожен випадок є індивідуальним, і тому ці характеристики були вибрані відповідно до потреб конкретної системи [3, 11].

Для проведення подальшого аналізу низькотемпературних режимів системи опалення будуть використані параметри в діапазоні $\Delta t_{dif} = 10 \dots 30^\circ\text{C}$ та не більше температури 55 °C, і для кожного діапазону аналіз обмежиться лише характеристиками з максимальним та мінімальним значеннями $t_{вх}/t_{вих}$, °C. Додатково буде

проаналізовано зміну тепловіддачі радіаторів також за середнього температурного режиму, 75/60 °C.

Аналіз зміни тепловіддачі радіатора в разі зниження температури теплоносія

Радіатор має забезпечувати тепловіддачу від приладу Q , Вт, за рахунок надходження теплоносія, що буде нагрівати опалюване приміщення (рис. 2):

$$Q = c_p \cdot G \cdot (T_{ex} - T_{vux}), \quad \text{Вт}, \quad (2)$$

де c_p – середня питома теплоємність теплоносія (води) в заданому діапазоні температур, кДж/(кг·K); G – витрата теплоносія в радіаторі, кг/с; $T_{вх}$ – температура теплоносія на вході в радіатор, K; $T_{вих}$ – температура теплоносія на виході з радіатора, K [6]. Оскільки йдеться про використання різниці температур теплоносія, то всі наведені температури теплоносія допустимо вказувати як t , °C, що може бути застосовано й для розрахунку інших різниць температур.

З рівняння (1) можна визначити кількість теплоносія, необхідну для забезпечення теплового потоку, яка є оберненою до різниці перепаду температур $(T_{вх} - T_{вих})$, K:

$$G = Q / (c_p \cdot (T_{\text{вх}} - T_{\text{вих}})), \text{ кг/с.} \quad (3)$$

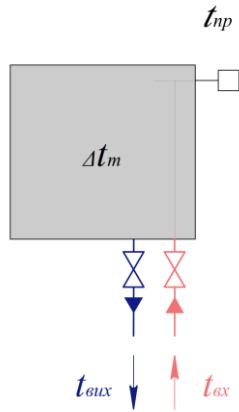


Рис. 2. Принципова схема радіатора з вбудованим терморегулятором, що відображає напрямок потоку теплоносія, температуру теплоносія й температуру повітря в приміщенні

Fig. 2. Schematic diagram of a radiator with a built-in thermostat, that displays the direction of heating medium flow, heating medium temperature and room air temperature

Оскільки задачею роботи є оцінка тепловіддачі радіаторів, Q , Вт, до навколишнього середовища за зміни температурного режиму, потрібно визначити від яких характеристик залежить ця тепловіддача. Згідно з [12]:

$$Q = \alpha \cdot F \cdot \Delta T_m, \text{ Вт,} \quad (4)$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі радіатора, Вт/(м²·К); F – площа поверхні радіатора, м²; ΔT_m – це температурний напір радіатора [6], що визначається як середня логарифмічна різниця температур між температурою теплоносія в радіаторі та температурою повітря в опалюваному приміщенні (температурою повітря, що оточує радіатор), $T_{\text{пр}}$, К [12]:

$$\Delta T_m = \frac{T_{\text{вх}} - T_{\text{вих}}}{\ln \frac{T_{\text{вх}} - T_{\text{пр}}}{T_{\text{вих}} - T_{\text{пр}}}}, \text{ К.} \quad (5)$$

Для практики інженерних розрахунків, згідно зі стандартом EN 442-2 [13], рівняння (4) спрощується до такої формули:

$$Q_i = \alpha \cdot \Delta T_m^n, \text{ Вт,} \quad (6)$$

де α та n – параметри, отримані з лабораторних досліджень, що враховують механізми теплопередачі радіаторів.

При впровадженні радіаторів їх характеристика тепловіддачі Q , Вт, є вказаною за номінальних (проектних) умов з заданим перепадом температури теплоносія $t_{\text{вх}}/t_{\text{вих}}$, °С та температури приміщення $t_{\text{пр}}$, °С – тобто Q_n , Вт [6]. Для перерахунку номінального значення тепло-

віддачі радіатора Q_n , Вт, на фактичне значення тепловіддачі радіатора Q_i , Вт, що відбувається за зміни температурного режиму, згідно з [12, 14] використовується формула:

$$Q_i = Q_n \left(\frac{\Delta T_{m,i}}{\Delta T_{m,n}} \right)^n, \text{ Вт,} \quad (7)$$

де Q_n – тепловіддача від радіатора за номінальних (проектних) умов, Вт; $T_{m,i}$ і $T_{m,n}$ – середня логарифмічна різниця температур між температурою теплоносія в радіаторі та температурою повітря, що оточує радіатор, відповідно для фактичних умов (індекс “m,i”) та номінальних (проектних) умов (індекс “m,n”), К.

Проте сьогодні такий спрощений підхід зазнає критики, й пропонується враховувати більшу кількість факторів. Зокрема, вплив зміни кількості теплоносія G , кг/с, що проходить через радіатор. Причому є різні дані щодо впливу зменшення кількості теплоносія внаслідок збільшення різниці температур теплоносія на вході в радіатор та на виході з нього Δt_{dif} , °С при збереженні значення середньої логарифмічної різниці температур між температурою теплоносія в радіаторі та температурою повітря, що оточує радіатор ΔT_m , К.

У дослідженні [15], опублікованому у виданні Федерації європейських асоціацій з опалення та кондиціонування повітря (скорочена назва – REHVA), було проаналізовано такий випадок і продемонстровано, що тепловіддача від приладу була більшою, ніж прогнозувалось за рівнянням (7). Це перевищення перебувало в діапазоні від 2 до 15 %. У другій частині вказаного дослідження [16] було запропоновано поправковий коефіцієнт, який, однак, обмежився радіатором певного типу та лише двома його довжинами.

У [17] питання витрати теплоносія розглядали в комплексі зі схемою руху теплоносія в радіаторі. Однак в цьому разі наводились дані щодо зменшення тепловіддачі приладу від 0,5 до 22 %. Найгірша тепловіддача спостерігалась за таких схем руху теплоносія в радіаторі, які вважаються неефективними [6]. Розбіжність між даними експериментів можна пояснити різними розглянутими моделями приладів.

У [6] наводився поправковий коефіцієнт для визначення впливу відмінності розрахункової витрати води в радіаторі G_i , кг/с, до її нормованого значення G_n , кг/с, на тепловіддачу:

$$\varphi_2 = (G_i / G_n)^p, \quad (8)$$

де p – емпіричний показник ступеня [6], значення якого $p = 0$ у певних діапазонах витрат теплоносія. Тобто за зміни кількості теплоносія G , кг/с, що проходить через радіатор, в певних діапазонах не було впливу на зміну тепловіддачі.

Тож з огляду на такі суперечності подальший аналіз у статті обмежено лише впливом зміни температури. Також в аналізі не враховані й інші показники [6]:

наприклад схема руху теплоносія в радіаторі чи барометричний тиск.

Таким чином, проведемо аналіз зниження тепловіддачі радіатора при зниженні температури в порівнянні з нормативним температурним режимом 90/70 °С й температурі приміщення $t_{пр} = 20$ °С при вибраному згідно з [3, 12] значенні експоненти $n = 1,3$ та з урахуванням раніше вибраних перепадів температури (табл. 1):

$$\eta = \left(1 - \left(\frac{\Delta T_{m,i}}{\Delta T_{m,n}} \right)^n \right) \cdot 100\% . \quad (9)$$

Згідно з рівнянням (9) при зниженні температури теплоносія на вході до радіатора $t_{вх}$, °С так само знижуватиметься й тепловіддача від радіатора Q_i , Вт. При цьому зниження тепловіддачі за однакової температури теплоносія на вході в радіатор $t_{вх}$, °С буде ще більшим, ніж зниження температури теплоносія на виході з радіатора $t_{вих}$, °С.

Таблиця 1. Зниження тепловіддачі радіатора внаслідок переходу з високотемпературної системи опалення з використанням природного газу на геотермальну систему опалення з використанням середнього та низькотемпературного режимів.

Table 1. Reduction of radiator heat output when switching from a high-temperature heating system using natural gas to a geothermal heating system using medium and low-temperature modes.

$t_{вх}$, °С	$t_{вих}$, °С	Δt_m , °С	η , %
<i>високотемпературна система опалення з використанням природного газу:</i>			
90	70	59,4	0,0
<i>геотермальне опалення:</i>			
<i>а) за середнього температурного режиму:</i>			
75	60	47,1	26,1
<i>б) за низькотемпературного режиму:</i>			
<i>при перепаді $\Delta t_{dif} = 10$ °С:</i>			
55	45	29,7	59,4
35	25	9,1	91,3
<i>при перепаді $\Delta t_{dif} = 15$ °С:</i>			
55	40	26,8	64,5
40	25	10,8	89,1
<i>при перепаді $\Delta t_{dif} = 20$ °С:</i>			
55	35	23,6	69,9
45	25	12,4	86,9
<i>при перепаді $\Delta t_{dif} = 30$ °С:</i>			
55	25	15,4	82,7

Аналіз результатів

Згідно з отриманими даними (табл. 1), у разі переходу на середній температурний режим опалення 75/60 °С за умови застосування геотермальної системи зниження розрахункової потужності радіаторів становитиме 26,1 %. А в разі переходу на низькотемпературний режим опалення за температурного режиму 55/45 °С – 59,4 %. І це найменше зниження тепловіддачі радіатора серед можливих варіантів $t_{вх}/t_{вих}$, °С, для низькотемпературних геотермальних систем опалення.

Отже, для забезпечення необхідного рівня тепловіддачі радіаторів до опалюваних приміщень потрібно знизити тепловтрати будівлі або підвищити рівень тепловіддачі від радіаторів. Слід зазначити, що встановлення систем геотермального опалення здійснюється переважно за умови термомодернізації будівель загалом [3], тому цей варіант потрібно розглядати як основний і лише в разі недостатньої тепловіддачі від радіаторів переходити до варіантів з підвищення тепловіддачі від радіаторів.

Таблиця 2. Приклад спрощеного розрахунку зниження тепловтрат приміщення житлової будівлі в м. Київ, побудованої в 2006 році згідно з [18] та термомодернізованої в 2024 році згідно з [19]

Table 2. An example of a simplified calculation of the reduction of heat losses in a room of a residential building in Kyiv, built in 2006 according to [18] and thermally modernised in 2024 according to [19]

Вид зовнішньої огороджувальної конструкції	$\zeta_{пл}$, %	R, (м²·К)/Вт		$\eta_{тепл}$, %	$\eta_{с.тепл}$, %
		в 2006 згідно з [18]	в 2024 згідно з [19]		
Зовнішні стіни	70 %	2,8	4,0	30,0	31,0
Вікна	30%	0,6	0,9	33,3	

Розглянемо, наскільки суттєвим може бути зниження тепловтрат, на прикладі приміщення житлової будівлі в м. Київ. В цьому приміщенні є лише одна зовнішня огорожувальна конструкція, яка складається зі стіни та вікна (табл. 2). Інші сторони приміщення межують з іншими приміщеннями будівлі, які опалюються, тому тепловтрати відбуваються лише через вказану зовнішню огорожувальну конструкцію. Зниження розрахункового значення тепловтрат через огорожувальну конструкцію приміщення такої будівлі, побудованої 2006 року згідно з [18] та термомодернізованої в 2024 році згідно з [19], становитиме:

$$\eta_{тепл} = \left(1 - \left(R_{2006,i} / R_{2024,i} \right) \right) \cdot 100\%, \% , \quad (10)$$

де $R_{2006,i}$ та $R_{2024,i}$ – мінімально допустиме значення приведеного опору теплопередачі i -ї огорожувальної конструкції, відповідно для 2006 та 2024 років.

Сумарне зниження розрахункового значення тепловтрат визначено залежно від того, яку частку площі зовнішньої стіни $\zeta_{пл}$, %, займатиме кожен тип огорожувальної конструкції:

$$\eta_{с.тепл} = \frac{1}{100} \sum_i^n (\zeta_{пл} \cdot \eta_{тепл}), \% \quad (11)$$

Отримане значення $\eta_{с.тепл} = 31,0\%$ (табл. 2) показує, що зниження розрахункових тепловтрат будівлі є достатнім для переходу на середній температурний режим геотермальної системи опалення, однак перехід на низькотемпературні режими геотермальної системи опалення потребуватиме значно істотнішого зниження тепловтрат.

Якщо ж не знижувати тепловтрати приміщення, а підвищити рівень тепловіддачі від радіаторів, то є два варіанти. Перший – заміна радіаторів на такі, що можуть забезпечити необхідну тепловіддачу (причому, залежно від типу обслуговуваної будівлі, достатньою може бути заміна лише деяких з них) [3, 8]; другий – використання вентиляторів для обдування радіаторів та підвищення тепловіддачі від них [20].

Висновки:

1. Перехід на низькотемпературні системи геотермального опалення є актуальним, однак проекти в цій сфері надають досить різноманітні дані щодо заданого температурного режиму водяної системи опалення. Це пояснюється тим, що кожен випадок є індивідуальним дослідом, і тому характеристики вибирались відповідно до потреб конкретної системи.
2. У науковій літературі зросла кількість публікацій щодо поправкових коефіцієнтів для перерахунку тепловіддачі радіаторів з високотемпературних систем опалення на низькотемпературні, оскільки врахування лише середньої логарифмічної різниці температур між температурою теплоносія в радіаторі й температурою приміщення є недостатнім. Однак є протилежні дані щодо впливу на тепловіддачу радіаторів зменшення кількості теплоносія, що проходить через них. Ці суперечності можна пояснити різними моделями приладів, для яких виконувалось таке порівняння.
3. Проведений аналіз показав, що виконана за правилами 2024 року термомодернізація будівлі в м. Києві, побудованої в 2006 році, здатна компенсувати зниження тепловіддачі радіаторів у раніше високотемпературній системі водяного опалення лише за середнього температурного режиму геотермальної системи опалення, але не за низькотемпературного. Є й альтернативні рішення, спрямовані на підвищення тепловіддачі від радіаторів з тим, щоби забезпечувати необхідне значення тепловіддачі. Це можна здійснити або заміною радіаторів на такі, що здатні забезпечити необхідну тепловіддачу, або влаштуванням вентиляторів для їх обдування та подальшого підвищення тепловіддачі.

ПОСИЛАННЯ

1. Lund H. et al. The status of 4th generation district heating: Research and results. Energy. 2018. Vol. 164. P. 147–159. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.08.206>
2. Lund H. et al. 4th Generation District Heating (4GDH). Energy. 2014. Vol. 68. P. 1–11. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.02.089>
3. Lämmle M. et al. Performance of air and ground source heat pumps retrofitted to radiator heating systems and measures to reduce space heating temperatures in existing buildings. Energy. 2022. Vol. 242. P. 122952. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122952>
4. Maivel M., Kurnitski J. Heating system return temperature effect on heat pump performance. Energy and Buildings. 2015. Vol. 94. P. 71–79. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.02.048>
5. Low-temperature district heating: heating our homes at lower cost – Analysis – IEA. IEA. URL: <https://www.iea.org/articles/low-temperature-district-heating-heating-our-homes-at-lower-cost> (дата звернення: 10.11.2024).
6. Любарець О. П., Зайцев О. М., Любарець В. О. Проектування систем водяного опалення (посібник для проектувальників, інженерів і студентів технічних ВНЗ). Відень–Київ–Сімферополь: ГЕРЦ Арматурен Г.м.б.Х, 2010. 200 с. URL: https://herz.ua/wp-content/uploads/lubarets_zaitsev_ukr.pdf (дата звернення: 10.10.2024).
7. Liu Z. et al. Research on Heating Performance of Heating Radiator at Low Temperature. Journal of Building Engineering. 2020. P. 102016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.102016>
8. Østergaard D. S., Svendsen S. Replacing critical radiators to increase the potential to use low-temperature district heating – A case study of 4 Danish single-family houses from the 1930s. Energy. 2016. Vol. 110. P. 75–84. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.03.140>
9. Yang X., Svendsen S. Ultra-low temperature district heating system with central heat pump and local boosters for low-heat-density area: Analyses on a real case in Denmark. Energy. 2018. Vol. 159. P. 243–251. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.06.068>
10. Benakopoulos T. et al. Implementation of a strategy for low-temperature operation of radiator systems using data from existing digital heat cost allocators. Energy.

2022. Vol. 251. P. 123844. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123844>
11. Jangsten M. et al. Survey of radiator temperatures in buildings supplied by district heating. *Energy*. 2017. Vol. 137. P. 292–301. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.07.017>
 12. Karlsson T., Ragnarsson A. Use of very low temperature geothermal water in radiator heating systems. *World Geothermal Congress 1995*. Florence, Italy, 18-31 May 1995. P. 2193–2198. URL: <https://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/WGC/1995/3-karlsson.pdf> (date of access: 02.11.2024).
 13. DIN EN 442-2:2015 «Radiators and convectors - Part 2: Test methods and rating». Deutsches Institut für Normung e. V., 2015. 81 p.
 14. Tunzi M. et al. Method to investigate and plan the application of low temperature district heating to existing hydraulic radiator systems in existing buildings. *Energy*. 2016. Vol. 113. P. 413–421. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.07.033>
 15. Gritzki R. et al. Can we still trust in EN 442? New Operating Definitions for Radiators – Part 1: Measurements and Simulations. *REHVA Journal*. 2021. № 01. P. 46–53. URL: <https://www.rehva.eu/rehva-journal/chapter/can-we-still-trust-in-en-442-new-operating-definitions-for-radiators-part-1-measurements-and-simulations-1> (date of access: 02.11.2024).
 16. Gritzki R. et al. Can we still trust in EN 442? New Operating Definitions for Radiators – Part 2: Model Based Analysis and Results. *REHVA Journal*. 2021. № 04. P. 47–54. URL: <https://www.rehva.eu/rehva-journal/chapter/can-we-still-trust-in-en-442-new-operating-definitions-for-radiators-part-2-model-based-analysis-and-results> (date of access: 02.11.2024).
 17. Marchesi R. et al. Experimental analysis of radiators' thermal output for heat accounting. *Thermal Science*. 2019. Vol. 23, no. 2. Part B. P. 989–1002. DOI: <https://doi.org/10.2298/tsci170301168m>
 18. ДБН В.2.6–31:2006 «Теплова ізоляція будівель». К.: Укрархбудінформ, 2006. 65 с.
 19. ДБН В.2.6–31:2021 «Теплова ізоляція та енергоефективність будівель». К.: ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій (НДІБК)», 2022. 23 с.
 20. Wang H. et al. Study on the performance of a forced convection low temperature radiator for district heating. *Energy*. 2023. P. 129036. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.129036>
 - P. 147–159. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.08.206>
 2. Lund H. et al. 4th Generation District Heating (4GDH). *Energy*. 2014. Vol. 68. P. 1–11. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.02.089>
 3. Lämmle M. et al. Performance of air and ground source heat pumps retrofitted to radiator heating systems and measures to reduce space heating temperatures in existing buildings. *Energy*. 2022. Vol. 242. P. 122952. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122952>
 4. Maivel M., Kurnitski J. Heating system return temperature effect on heat pump performance. *Energy and Buildings*. 2015. Vol. 94. P. 71–79. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.02.048>
 5. Low-temperature district heating: heating our homes at lower cost – Analysis – IEA. IEA. URL: <https://www.iea.org/articles/low-temperature-district-heating-heating-our-homes-at-lower-cost> (date of access: 10.11.2024).
 6. Liubarets O. P., Zaitsev O. M., Liubarets V. O. Proektuvannia system vodianoho opalennia (posibnyk dlia proektuvalnykiv, inzheneriv i studentiv tekhnichnykh VNZ) [Design of water heating systems (manual for designers, engineers and students of technical universities)]. Vienna–Kyiv–Simferopol: Herz Armaturen GmbH, 2010. 200 c. URL: https://herz.ua/wp-content/uploads/liubarets_zaitsev_ukr.pdf (date of access: 10.10.2024). [in Ukrainian]
 7. Liu Z. et al. Research on Heating Performance of Heating Radiator at Low Temperature. *Journal of Building Engineering*. 2020. P. 102016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.job.2020.102016>
 8. Østergaard D. S., Svendsen S. Replacing critical radiators to increase the potential to use low-temperature district heating – A case study of 4 Danish single-family houses from the 1930s. *Energy*. 2016. Vol. 110. P. 75–84. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.03.140>
 9. Yang X., Svendsen S. Ultra-low temperature district heating system with central heat pump and local boosters for low-heat-density area: Analyses on a real case in Denmark. *Energy*. 2018. Vol. 159. P. 243–251. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.06.068>
 10. Benakopoulos T. et al. Implementation of a strategy for low-temperature operation of radiator systems using data from existing digital heat cost allocators. *Energy*. 2022. Vol. 251. P. 123844. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123844>
 11. Jangsten M. et al. Survey of radiator temperatures in buildings supplied by district heating. *Energy*. 2017. Vol. 137. P. 292–301. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.07.017>
 12. Karlsson T., Ragnarsson A. Use of very low temperature geothermal water in radiator heating systems. *World*

REFERENCES

1. Lund H. et al. The status of 4th generation district heating: Research and results. *Energy*. 2018. Vol. 164.

- Geothermal Congress 1995. Florence, Italy, 18-31 May 1995. P. 2193–2198. URL: <https://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/WGC/1995/3-karlsson.pdf> (date of access: 02.11.2024).
13. DIN EN 442-2:2015 «Radiators and convectors - Part 2: Test methods and rating». Deutsches Institut für Normung e. V., 2015. 81 p.
 14. Tunzi M. et al. Method to investigate and plan the application of low temperature district heating to existing hydraulic radiator systems in existing buildings. *Energy*. 2016. Vol. 113. P. 413–421. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.07.033>
 15. Gritzki R. et al. Can we still trust in EN 442? New Operating Definitions for Radiators – Part 1: Measurements and Simulations. *REHVA Journal*. 2021. № 01. P. 46–53. URL: <https://www.rehva.eu/rehva-journal/chapter/can-we-still-trust-in-en-442-new-operating-definitions-for-radiators-part-1-measurements-and-simulations-1> (date of access: 02.11.2024).
 16. Gritzki R. et al. Can we still trust in EN 442? New Operating Definitions for Radiators – Part 2: Model Based Analysis and Results. *REHVA Journal*. 2021. № 04. P. 47–54. URL: <https://www.rehva.eu/rehva-journal/chapter/can-we-still-trust-in-en-442-new-operating-definitions-for-radiators-part-2-model-based-analysis-and-results> (date of access: 02.11.2024).
 17. Marchesi R. et al. Experimental analysis of radiators' thermal output for heat accounting. *Thermal Science*. 2019. Vol. 23, no. 2. Part B. P. 989–1002. DOI: <https://doi.org/10.2298/tsci170301168m>
 18. DBN V.2.6–31:2006 «Теплова ізоляція будівел» [Thermal insulation of buildings]. K.: Ukrarkhbudinform, 2006. 65 p. [in Ukrainian]
 19. DBN V.2.6-31:2021 «Теплова ізоляція та енергоefektyvnist budivel» [Thermal insulation and energy efficiency of buildings]. K.: DP «Derzhavnyi naukovy-doslidnyi instytut budivelnikh konstrukttsii (NDIBK), 2022. 23 p. [in Ukrainian]
 20. Wang H. et al. Study on the performance of a forced convection low temperature radiator for district heating. *Energy*. 2023. P. 129036. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.129036>