

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ ПІДЛОГОВОГО ОПАЛЕННЯ СУХОГО МОНТАЖУ

Басок Б. І., Ткаченко М. В., Недбайло О. М., Божко І. К.

1. Вступ

Світові тенденції у підвищенні енергетичної ефективності систем тепlopостачання в цілому спрямовані на використання природних відновлювальних джерел енергії, швидких вторинних енергоресурсів, децентралізацію постачання теплоти, а також перехід на низькотемпературні опалювальні системи.

При застосуванні теплонасосних установок у складі систем тепlopостачання перевага надається низькотемпературним системам водяного підлогового опалення. Це пов'язано з тим, що при такому опаленні площа теплообміну між теплоносієм та повітрям в приміщенні значно більша в порівнянні з іншими системами і, відповідно до цього, температурний потенціал теплоносія можна знижувати. Крім того, підлогове опалення забезпечує найбільш комфортні санітарно-гігієнічні умови щодо перебування людини в приміщенні.

Тому актуальним є дослідження впливу конструкції та фінішного покриття низькотемпературних систем підлогового опалення на їх теплотехнічні характеристики роботи та енергетичну ефективність.

2. Об'єкт дослідження та його технологічний аудит

Об'єктом дослідження є теплотехнічні характеристики роботи фрагмента системи підлогового опалення сухого монтажу площею $6,36 \text{ м}^2$ і розмірами $1,2 \text{ м} \times 5,3 \text{ м}$.

Система опалення була розташована посередині лабораторного приміщення площею 18 м^2 із розмірами $3 \times 6 \times 3 \text{ м}$. Її монтажна схема показана на рис. 1.



Рис. 1. Схема системи підлогового опалення сухого монтажу:

- 1 – фінішне покриття підлоги (ламініат, керамічна плитка);
- 2 – підложка (целюлоза, гіпсоволокно);
- 3 – алюмінієвий теплорозподілювач;
- 4 – пінополістирольна плита;
- 5 – труба контуру опалення;
- 6 – стартова підлога

Опалювальний контур виконаний з металополімерної труби РеХ зовнішнім діаметром 16 мм і товщиною стінки 2 мм. Товщини, відповідно, алюмінієвого теплорозподільвача та плити із екструдованого пінополістиролу з пазами (каналами) складали 0,2 мм та 40 мм (загальна, змінювалась в різних експериментах).

За допомогою такого технічного рішення відбувалось термостатування повітря приміщення відповідно до санітарно-гігієнічних норм (20 ± 2 °С) у квазістаціонарних умовах. В залежності від зміни температури зовнішнього повітря дискретно задавались значення електричної потужності (теплове навантаження) на проточному електроводонагрівачі для компенсації теплових втрат приміщення при постійній витраті теплоносія в контурі системи опалення.

Для регулювання потужності електроводонагрівача ВПО-5,5/220 використовувались стабілізоване джерело ССК-1-3-220 (Росія) електричного струму 220 В 50 Гц, лабораторний автотрансформатор РНО-250-5 (Україна) і переносний вимірювальний комплект К-50 (Україна), що реєстрував силу струму, електричні напругу і потужність в ході проведення досліджень.

Встановлювались дослідні значення електричної потужності: 200, 300, 400, 500 і 600 Вт. При цьому експеримент продовжувався до стабілізації розподілу температурного поля в повітрі над підлогою та в шарах підлоги приміщення (відсутності зміни значень температури і теплового потоку в характерних місцях вимірювання). Час виходу на квазістаціонарний режим роботи дослідної системи з покриттям ламінатом складав близько 8–12 годин в залежності від теплового навантаження.

Одним з найбільш проблемних місць при проведенні експериментальних досліджень виявилась мала площа досліджуваної системи опалення, відносно об'єму приміщення. При значних добових коливаннях температури зовнішнього повітря виявлялись складнощі з виходом роботи системи опалення на квазістаціонарний режим.

3. Мета та задачі дослідження

Мета дослідження – визначення шляхів підвищення загальної енергетичної ефективності системи підлогового опалення сухого монтажу.

Для досягнення поставленої мети виконувались такі задачі:

1. Експериментально дослідити вплив товщини теплоізоляційного шару на властивості теплопередачі від теплоносія до повітря в приміщенні.
2. Експериментально дослідити вплив виду фінішного покриття системи підлогового опалення сухого монтажу на властивості теплопередачі від теплоносія до повітря в приміщенні.
3. Визначити оптимальний експлуатаційний режим роботи та метод регулювання теплопродуктивності системи підлогового опалення.

4. Дослідження існуючих рішень проблеми

Дослідженням процесу теплопередачі у системах підлогового опалення присвячено не достатньо багато уваги. Основний метод дослідження – математичне моделювання роботи теплої водяної підлоги з різними граничними умовами. Так, в роботах [1, 2] розглядається класична модельна задача тепlopостачання приміщення за допомогою системи підлогового опалення. Вводиться поняття еквівалентної термостійкості – за допомогою якої можливо провести оптимізаційні розрахунки та

підібрати склад фінішного покриття. Однак, значна кількість спрощень геометричної форми та граничних умов погіршують точність отриманих результатів.

Ряд робіт присвячено розробці нестационарних моделей теплової взаємодії підлогової системи опалення з повітрям всередині приміщення при різних умовах. Розглядаються динаміка прогріву приміщення [3] та пропонуються нестандартні багат шарові системи опалення [4]. Однак, без проведення верифікації даних моделей на основі експериментальних досліджень важко оцінити адекватність їх роботи. Також, в даних роботах відсутній аналіз впливу теплофізичних властивостей фінішного покриття підлоги на ефективність підлогового опалення.

Ряд робіт присвячені дослідженню роботи системи підлогового опалення та впливу меблів на розподіл температури та тепловий режим приміщення. Так, в роботі [5] досліджується житлове приміщення з системою підлогового опалення при наявності меблів. Приводяться результати математичного моделювання та їх співставлення з експериментальними даними.

Найбільш глибоко аналіз впливу фінішного покриття підлоги наведено в роботі [6]. Дослідження проводились з використанням теплої водяної підлоги стандартного методу укладки в бетонній подушці. Була розроблена математична модель та проведено експериментальні дослідження, які показали, що в якості фінішного покриття доцільно використовувати матеріали з високою теплопровідністю. Іншим важливим фактором є тепла ізоляція поверхні, над якою змонтовано систему підлогового опалення.

Іншим напрямком досліджень низькотемпературних опалювальних приладів є оптимізаційні розрахунки та пошуки інноваційних рішень при створенні систем підлогового опалення. В роботі [7] розглянуто модель та результати розрахунку опалювального підлогового приладу, що використовує ефекти фазових переходів теплоносія при теплопостачанні від теплового насоса. Роботи [8, 9] досліджують можливість спільного використання низькотемпературних та класичних опалювальних приладів в житлових будинках. Однак, немає даних експериментальних досліджень та оцінки ефективності роботи таких систем підлогового опалення.

Робота [10] присвячена дослідженню роботи системи підлогового опалення разом з тепловим насосом типу «повітря-вода». Проводяться ряд дослідів, в результаті яких виявлено економічно оптимальний режим експлуатації даної системи опалення.

Таким чином, дослідження та вдосконалення роботи системи підлогового опалення є перспективною задачею, пов'язаною з підвищенням енергоефективності систем теплопостачання будівель. Однак, авторами розглядаються «класичні» системи підлогового опалення – трубчаті теплообмінники, що вмонтовано в бетонні або цементні подушки. При цьому, мало уваги приділено розробкам нових конструкцій систем підлогового опалення та дослідженню впливу фінішного покриття на ефективність їх роботи та температурний стан приміщення в умовах реальної експлуатації.

5. Методи дослідження

Проведення експериментальних досліджень полягало у вимірюванні, в

режимі реального часу, густини теплового потоку і температури в характерних місцях системи опалення та температури внутрішнього повітря за допомогою термоелектроперетворювачів із наступним аналізом ефективності теплопередачі між теплоносієм і повітрям в приміщенні.

При проведенні експериментів системою вторинних контрольно-вимірювальних приладів реєструвалися із інтервалом 10 хв. наступні значення:

- температури повітря по висоті кімнати в 16 вимірювальних точках (визначалась середня температура t);
- температура зовнішнього повітря;
- температура в різних контрольних точках (в т. ч. на поверхні підлоги над подавальним і зворотнім трубопроводами) системи підлогового опалення, як по горизонталі (в різних місцях відносно опалювального контуру), так і по вертикалі, під утепленням і між шарами системи ($-430,0 \dots 0,0$ мм);
- значення температури теплоносія на вході та виході контуру опалення;
- значення густини теплового потоку під підлогу, між різними шарами підлоги, на поверхні підлоги в характерних місцях відносно контуру опалення (прямокутні позначки) (рис. 2).

За показниками лічильника теплоти Apator LQM-III-K (Польща), що встановлений перед входом до контуру системи, визначалось дискретне теплове навантаження, що відповідало встановленій потужності на електроводонагрівачі.

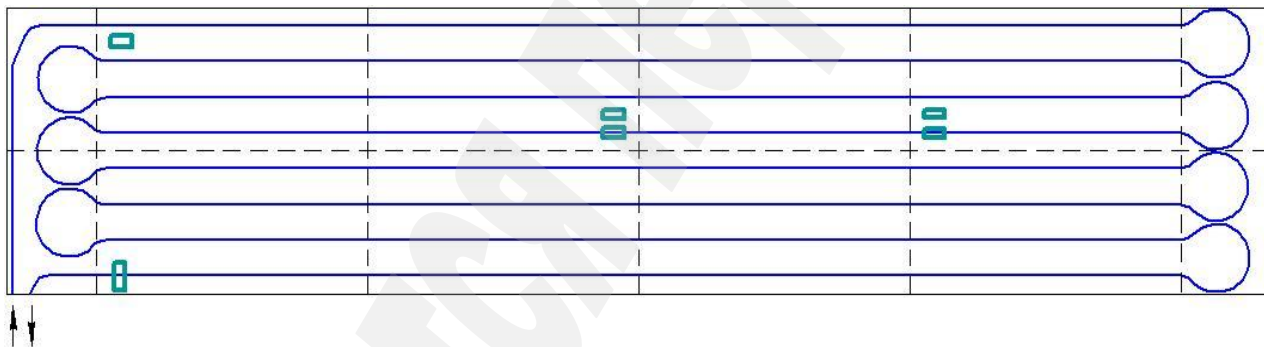


Рис. 2. Конфігурація розміщення датчиків у системі підлогового опалення

При проведенні всіх експериментів вибирались дні із мінімальним добовим коливанням значень температури зовнішнього повітря і швидкості його руху (вітру). Це забезпечувало максимальну наближеність до постійності тепловтрат приміщення в часі.

Згідно з нормативною документацією в зонах найбільшого охолодження приміщення (близько зовнішніх огорожувальних конструкцій) температуру на поверхні нагрівальної підлоги слід приймати не більше 35°C . Це також враховувалось при проведенні експериментів (відповідно, не перевищувалось теплове навантаження).

При цьому загальна відносна похибка вимірювань основних фізичних величин в автоматизованому режимі складала не більше 5 %.

Проведені серії експериментів із значеннями об'ємної витрати теплоносія в контурі підлогового опалення $G=0,102$ та $0,058$ м³/год, різною загальною товщиною пінополістирольної плити 40, 50, 80 мм та фінішними покриттями ламінатом та

плиткою. Ламінат товщиною 8 мм укладався за технологією на целюлозну підложку товщиною 4 мм, а керамічна плитка товщиною 8 мм наклеювалась за допомогою спеціальної суміші на алюмінієвий теплорозподільувач.

Якщо приміщення із водяним підлоговим опаленням розглядати як теплообмінник між теплоносієм в опалювальному контурі і повітрям в приміщенні, то можна записати рівняння теплопередачі для цієї системи:

$$Q = k \cdot F \cdot \overline{\Delta t}, \quad (1)$$

де k – коефіцієнт теплопередачі системи підлогового опалення, Вт/(м²·К) (враховує значну кількість чинників, що пов'язані з конструкцією підлогового опалення); F – площа поверхні теплообміну, м².

При цьому середня різниця температур води та повітря (температурний напір) $\overline{\Delta t}$ тут визначається за формулою [11]:

$$\overline{\Delta t} = \frac{\Delta t_{\max} - \Delta t_{\min}}{\ln \frac{\Delta t_{\max}}{\Delta t_{\min}}}, \quad (2)$$

де Δt_{\max} – різниця температур води на вході в контур опалення та повітря в приміщенні; Δt_{\min} – різниця температур води на виході з контуру опалення та повітря в приміщенні, °С.

Питомий тепловий потік з поверхні підлоги, що може забезпечити система водяного підлогового опалення певної конструкції, прямопропорційний середній різниці температур теплоносія системи і повітря в опалювальному приміщенні:

$$q = k \cdot \overline{\Delta t}. \quad (3)$$

Вищенаведений коефіцієнт враховує термічні опори трубки опалювального контуру і монолітної нагрівальної плити (панелі), в якій змонтований контур опалення, фінішного шару підлоги, шарів теплоізоляції під опалювальним контуром. А також геометричні параметри системи: крок укладання труби та її діаметр [12]. У зв'язку з цим виникають розрахункові складнощі з аналітичним визначенням коефіцієнту теплопередачі такої системи.

6. Результати досліджень

Отримані результати розрахунків можна представити у вигляді номограм теплового навантаження для окремих конструкцій водяного підлогового опалення, теплотехнічні параметри яких досліджуються. Номограми побудовані для різних значень товщини теплоізоляції (пінополістирольних плит), об'ємної витрати теплоносія в контурі, температури зовнішнього повітря (теплових втрат приміщення) та фінішного покриття підлоги.

З номограм можна визначити коефіцієнт теплопередачі k . Його величина дорівнює значенню тангенса кута нахилу номограми теплового навантаження системи опалення до горизонтальної вісі абсцис. Користуючись отриманими номограмами, при заданій температурі в приміщенні, і температурним графіком теплоносія в системі, можна визначити необхідну площу системи підлогового опалення, теплопродуктивна здатність якої забезпечить відомі тепловтрати з приміщення. Дані номограми можуть бути основою інженерної методики теплового розрахунку низькотемпературних водяних підлогових опалювальних систем.

Результати проведених експериментів представлені у графічному вигляді на рис. 3–5.

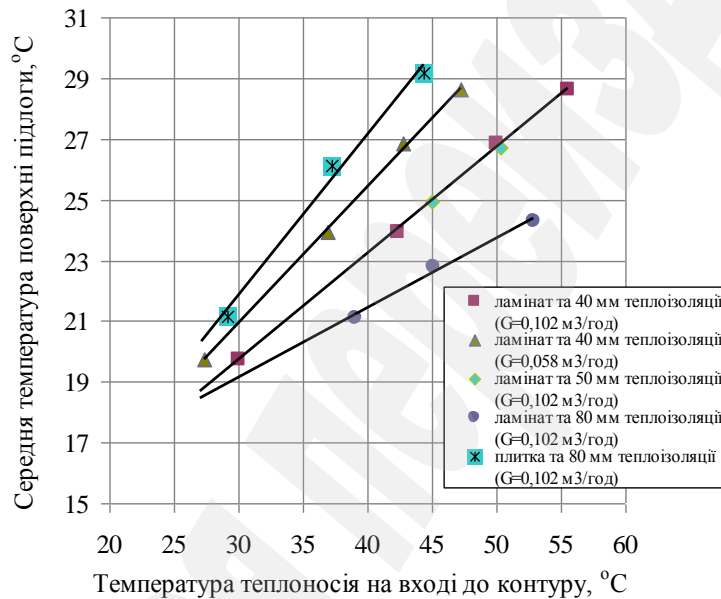


Рис. 3. Залежність середньої температури поверхні підлоги від температури теплоносія на вході до контуру підлогового опалення

Як видно з рис. 3, суттєве зростання середньої температури поверхні підлоги обумовлене використанням керамічної плитки як фінішного покриття. Це пояснюється більшим значенням коефіцієнта теплопровідності даного матеріалу. В той час, як різна витрата теплоносія в певному діапазоні майже не впливає на зміну температури поверхні ламінату. Це доводить тезу про те, що кількісне регулювання теплопродуктивністю низькотемпературних систем опалення недоцільне. Більш ефективним, в такому випадку, є якісне регулювання тепловим навантаження із зміною температури теплоносія в системі. Збільшення вдвічі товщини теплоізоляції зменшує, за окремими розрахунками на приблизно 12 %, теплові втрати від теплоносія в контурі у простір під системою підлогового опалення. Відповідно, це позначається на тому, що при меншій температурі поверхні фінішного покриття досягається покриття теплових втрат приміщення згідно до відповідних нормативів.

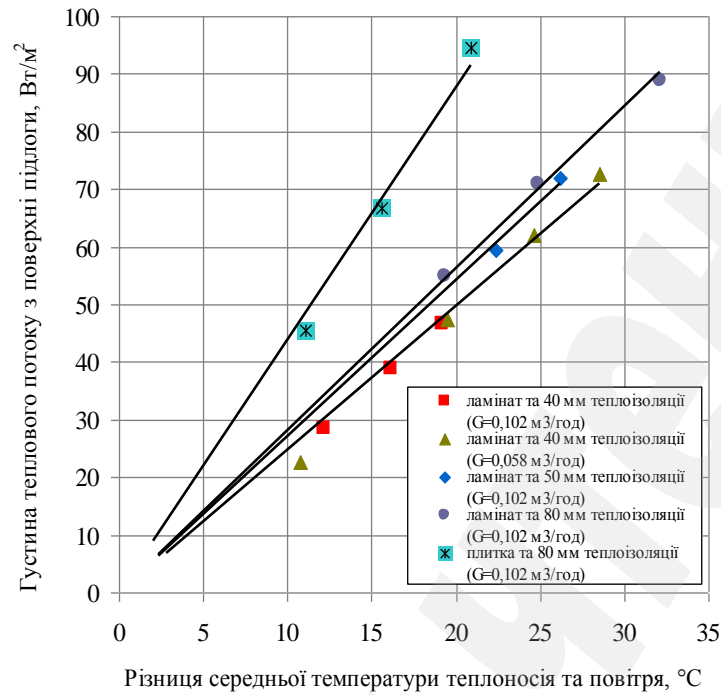


Рис. 4. Залежність густини теплового потоку з поверхні підлоги від середньої різниці температур води та повітря в приміщенні

Рис. 4 демонструє суттєве підвищення густини теплового потоку на поверхні керамічної плитки внаслідок її меншого термічного опору та більш щільнішого (клеєвого) контакту із алюмінієвим теплорозподільвачем. Зміна значень витрати теплоносія в контурі несуттєво позначається на питомому тепловому потоці з поверхні ламінату. Збільшення товщини теплової ізоляції на 10 мм дозволяє збільшити густину теплового потоку на поверхні підлоги на 5 Вт/м^2 .

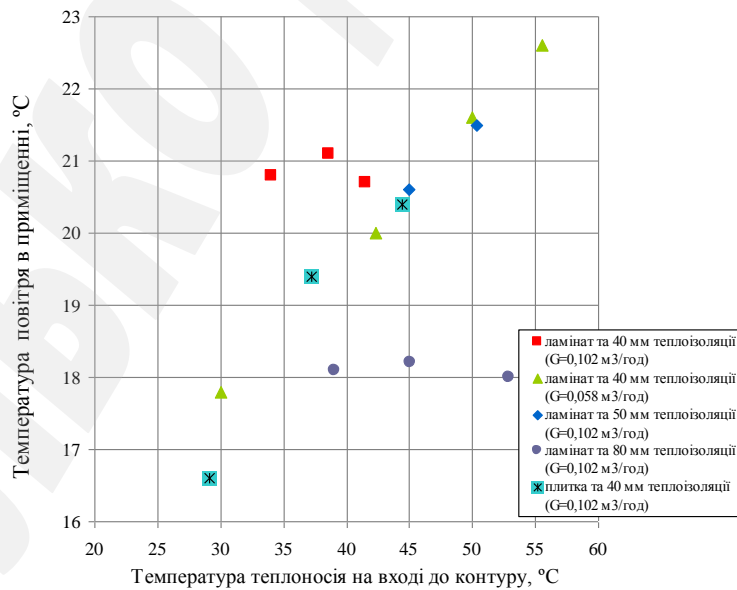


Рис. 5. Залежність температури теплоносія на вході до контуру підлогового опалення від різниці середньої температури теплоносія та повітря в приміщенні

На рис. 5 видно, що температура повітря в приміщенні тим вища, чим більша температура теплоносія на вході. Слід зазначити, що середня температура зовнішнього повітря під час проведення різних експериментів, відповідно, в кожному змінювалась в діапазоні від -7 до 3 °С, що впливало на тепловтрати приміщення. При цьому в більшості випадків майже всі дослідні варіанти системи опалення забезпечили необхідні теплові санітарно-гігієнічні умови.

7. SWOT-аналіз результатів досліджень

Strengths. У порівнянні з аналогами, система підлогового опалення сухого монтажу має ряд переваг – малу інерційність роботи, рівномірний розподіл температурного поля за рахунок використання алюмінієвого теплорозподільвача та простота монтажу.

Weaknesses. До слабких сторін даної системи підлогового опалення можна віднести слабку стійкість до механічних пошкоджень. Оскільки в даній системі відсутня монолітна бетонна або цементна подушка, то при пошкодженні фінішного покриття виникає велика ймовірність розгерметизації опалювального контуру.

Opportunities. Проведені експериментальні дослідження дають змогу в подальшому розробити математичну модель роботи системи підлогового опалення сухого монтажу. За допомогою моделі стане можливим провести оптимізаційні розрахунки та вдосконалити конструкцію даного опалювального приладу.

Threats. Застосування розглянутої системи підлогового опалення пов'язано з більш високими, у порівнянні з аналогічними опалювальними приладами, початковими капіталовкладеннями. Це зумовлено використанням в конструкції алюмінієвого теплорозподільвача та пінополістирольної плити зі спеціальними пазами.

8. Висновки

1. В результаті проведених експериментальних досліджень виявлено вплив товщини теплоізоляційного шару на властивості теплопередачі від теплоносія до повітря в приміщенні. Штатна плита із екструдованого пінополістиролу товщиною 40 мм не здатна мінімізувати тепловтрати в підлогу під системою підлогового опалення сухого монтажу. Це пояснюється конструктивними особливостями даної системи опалення – пазами під трубою контуру, які майже вдвічі зменшують теплоізоляційний шар під ним. Збільшення товщини теплової ізоляції до 50 мм дозволяє підвищити ефективність роботи системи підлогового опалення на 10 % (густина теплового потоку збільшується з 50 до 55 Вт/м^2 при температурі в приміщенні 20 °С). Подальше збільшення товщини ізоляційного шару до 80 мм значного ефекту не мав.

2. Значний вплив на властивості теплопередачі від теплоносія до повітря в приміщенні має фінішне покриття. При використанні керамічної плитки та при однакових витратах і температурі теплоносія на вході, густина теплового потоку на поверхні підлоги збільшилась на 50 % (з 57 до 86 Вт/м^2 при температурі в приміщенні 20 °С).

3. Проведені експериментальні дослідження дозволяють стверджувати, що система підлогового опалення сухого монтажу має більшу теплову маневреність в порівнянні із заливною стяжкою, а також невисоку теплоакumuляційну здатність. Мала теплоінерційна складова досягається відсутністю відносно товстого шару

монолітної бетонної плити, в якій зазвичай облаштовується контур системи опалення. Завдяки алюмінієвим теплорозподільвальним пластинам відбувається вирівнювання теплового потоку в площині поверхні підлоги, що позитивно впливає на тепловий розподіл та зменшує термічні напруження в фінішному покритті. Застосування кількісного регулювання теплового навантаження системи, завдяки зміні витрати теплоносія, виявляється менш ефективним аніж якісне, за допомогою зміни його температури.

Література

1. Liu Y., Wang D., Liu J. Study on heat transfer process for in-slab heating floor // *Building and Environment*. 2012. Vol. 54. P. 77–85. doi: <http://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.02.007>
2. Jin X., Zhang X., Luo Y. A calculation method for the floor surface temperature in radiant floor system // *Energy and Buildings*. 2010. Vol. 42. No. 10. P. 1753–1758. doi: <http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.05.011>
3. Simulation of the thermal state of the premises with the heating system «Heat-insulated floor» / Sotnik M. I. et al. // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2015. Vol. 6. No. 5 (78). P. 22–27. doi: <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.56647>
4. Romanchenko M., Slesarenko A., Kundenko M. Effect of thermal field distribution in the layered structure of a heating floor on the temperature of its surface // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 1. No. 8 (91). P. 57–63. doi: <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.121827>
5. Thermal performance of radiant heating floors in furnished enclosed spaces / Fontana L. et al. // *Applied Thermal Engineering*. 2011. Vol. 31. No. 10. P. 1547–1555. doi: <http://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2010.12.014>
6. Zhang D., Cai N., Wang Z. Experimental and numerical analysis of lightweight radiant floor heating system // *Energy and buildings*. 2013. Vol. 61. P. 260–266. doi: <http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.02.016>
7. Modeling a radiant floor system with Phase Change Material (PCM) integrated into a building simulation tool: Analysis of a case study of a floor heating system coupled to a heat pump / Mazo J. et al. // *Energy and Buildings*. 2012. Vol. 47. P. 458–466. doi: <http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.12.022>
8. Hasan A., Kurnitski J., Jokiranta K. A combined low temperature water heating system consisting of radiators and floor heating // *Energy and Buildings*. 2009. Vol. 41. No. 5. P. 470–479. doi: <http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.11.016>
9. Myhren J. A., Holmberg S. Flow patterns and thermal comfort in a room with panel, floor and wall heating // *Energy and Buildings*. 2008. Vol. 40. No. 4. P. 524–536. doi: <http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.04.011>
10. Study of the optimal control problem formulation for modulating air-to-water heat pumps connected to a residential floor heating system / Verhelst C. et al. // *Energy and Buildings*. 2012. Vol. 45. P. 43–53. doi: <http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.10.015>
11. Isachenko V. P., Osipova V. A., Sukomel A. C. *Teploperedacha*. Moscow, 1981. 416 p.
12. Nizovtsev M. I., Sakharov I. A. Opredelenie teplovykh i konstruktivnykh parametrov vodyanogo teplogo pola: proceedings // *Energo- i resursoeffektivnost' maloetazhnykh zhilykh zdaniy*. Institut teplofiziki im. S. S. Kutateladze SORAN. 2013. P. 39–43.