

УДК 697.1

Теплофізичне моделювання та дослідження теплотехнічних характеристик водяної теплої підлоги сухого способу укладання

Б. І. Басок¹, М. П. Новіцька², С. М. Гончарук³

¹ д.т.н., проф. Інститут технічної теплофізики НАН України, м. Київ, Україна, basok@itf.kiev.ua,
ORCID:0000-0002-8935-4248

² к.т.н., с.н.с. Інститут технічної теплофізики НАН України, м. Київ, Україна, mmarina@ukr.net,
ORCID: 0000-0003-2867-101X

³ к.т.н., провідний науковий співробітник. Інститут технічної теплофізики НАН України, м. Київ, Україна,
goncharuk-s@ukr.net, ORCID: 0000-0002-5609-7337

***Анотація.** Використання систем підлогового опалення є ефективним способом досягнення теплового комфорту користувачів у енергоефективних будівлях. У роботі наведено теоретичні дослідження теплотехнічних параметрів системи теплої водяної підлоги сухого способу укладання. Система сухого монтажу, яка розглянута в роботі, складається із утеплювача (пінополістирол), на якому розташовано труби системи опалення, що контактують із алюмінієвою теплорозподільною пластиною. Цю систему покрито згори фінішним покриттям. Розрахунок проводився на основі системи рівнянь імпульсу й енергії та виконаний для стаціонарного режиму експлуатації системи підлогового опалення. Валідація моделі проведена із використанням результатів експериментальних досліджень. У роботі зроблено висновки, що дану конфігурацію системи підлогового опалення, можливо використовувати в системах опалення житлових і нежитлових приміщень. Алюмінієва теплорозподільна пластина суттєво впливає на теплообмінні процеси в системі. Завдяки ній відбувається вирівнювання теплового потоку в площині поверхні підлоги, що позитивно впливає на тепловий розподіл та зменшує термічні напруження у фінішному покритті. Використання керамічної плитки збільшує загальну ефективність теплообміну системи з повітрям приміщення. Збільшення товщини плити пінополістиролу збільшує значення густини теплового потоку з поверхні теплої підлоги. До збільшення густини теплового потоку із поверхні підлоги також приводить збільшення витрати та температури теплоносія.*

***Ключові слова:** тепла підлога, алюмінієва теплорозподільна пластина, чисельне моделювання, сухий спосіб монтажу*

Вступ. Використання систем підлогового опалення є ефективним способом досягнення теплового комфорту користувачів у енергоефективних будівлях. Використання таких систем широко розповсюджується в Україні та світі. У теперішній час існує два типи таких систем:

- традиційна система підлогового опалення;
- система підлогового опалення сухого монтажу.

У традиційних системах, труби розташовано в прошарку цементно-піщаної стяжки. Стяжка лежить на утеплювачі та покривається фінішним покриттям.

У системах сухого монтажу цементно-піщана стяжка не використовується. Труби із теплоносієм розміщують на утеплювачі. Вони контактують із алюмінієвою теплорозподільною пластиною. Ця система покривається фінішним покриттям.

Актуальність дослідження. Підвищення енергоефективності будівель, зокрема, з використанням радіаційного підлогового опалення, є актуальною задачею, пов'язаною зі збереженням вичерпних енергетичних ресурсів та енергетичною безпекою держави.

Останні дослідження та публікації. У теперішній час у науковій літературі можна знайти достатню кількість досліджень систем підлогового опалення. Так, традиційним системам присвячено роботи [1-6]. Наприклад, в [1] розглянуто двовимірну нестационарну модель для системи водяного підлогового опалення. Основну увагу в роботі приділено визначенню теплових потоків, що втрачаються крізь фундамент. Показано, що вони істотно впливають на енергоспоживання енергоефективного будинку. Але в моделі не враховується вологість ґрунту, що приводить до недооцінювання теплових потоків.

Моделювання тепловіддачі від системи підлогового опалення до простору кімнати розглядається в роботах [2, 3]. У [2] представлено результати чисельного моделювання теплообміну між теплоносієм та повітрям у приміщенні з підлоговим опаленням. Результати моделювання зіставлено з експериментом. Методом чисельного моделювання отримано графіки навантаження підлогового опалення для різних кроків укладання труби.

У [3] проведено параметричний аналіз, системи підлогового опалення кімнати з розмі-

рами 3×4 м методом чисельного моделювання. Метою є визначення впливу індивідуальних параметрів на систему підлогового опалення. Дослідження, наведені в роботі, показали, що діаметр і матеріал труби не істотно впливає на ефективність системи підлогового опалення. Найбільш впливовими параметрами є товщина та тип підлогового покриття.

У [4] наведено аналітичне рішення для спрощеної схеми системи підлогового опалення. Доведено, що використані в роботі спрощення істотно не впливають на результати розрахунків. Наведені результати задовільно узгоджуються з чисельним розв'язком та експериментальними даними.

У роботі [5] запропоновано дві моделі для покращення точності розрахунків теплових процесів у стяжці традиційної водяної теплої підлоги. Проте ці моделі неможливо застосувати при розрахунках інших типів систем підлогового опалення.

Метод розрахунку температури поверхні системи підлогового опалення запропоновано в [6]. Систему підлогового опалення в моделі представлено у вигляді двох шарів. У роботі показано, що результати розрахунку температури поверхні добре узгоджуються з чисельним моделюванням та експериментальними даними.

Досліджень, що стосуються систем підлогового опалення сухого монтажу значно менше [7-11]. У роботі [7] за допомогою чисельного моделювання та експерименту досліджено систему підлогового опалення без бетонної стяжки. Ця система складається з шару утеплювача, покритого алюмінієвою фольгою. На ньому в повітряному прошарку лежать труби системи водяного підлогового опалення. Згори від них розташовано шар підлогового покриття.

У зазначеній роботі [7] досліджено вплив таких параметрів, як температура води, що подається в систему, та відстань між трубами системи опалення. Дослідження виконано на моделі, валідація якої проведена за допомогою експериментального стенда. Крім того, у роботі проаналізовано тепловий комфорт у приміщенні. Показано, що система працює стабільно. Тепловий комфорт у приміщенні, яке обладнано такою системою, відповідає необхідним критеріям.

У роботі [8] досліджено систему сухого способу монтажу, у якій теплорозподільною пластиною є поліетиленові мати, покриті тонким шаром алюмінію. Над нею розміщено

шар сухої стяжки та фінішне покриття. Наведено порівняння цієї системи із системою, що має алюмінієву теплорозподільну пластину. Показано, що при використанні поліетиленових матів із металізованою плівкою тепловий потік з поверхні системи з матами на 43...66 % менший ніж при використанні алюмінієвої теплорозподільної пластины, хоча металізовані мати дешевші.

Формулювання цілей статті. Метою цієї роботи є проведення теоретичних досліджень теплотехнічних параметрів системи водяної теплої підлоги сухого способу укладання з алюмінієвою теплорозподільною пластиною без бетонної стяжки.

Основна частина. Для підтвердження ефективності системи з алюмінієвою пластиною було виконано чисельне моделювання процесів теплообміну між теплоносієм (водою) та повітрям над фрагментом системи на рис. 1.

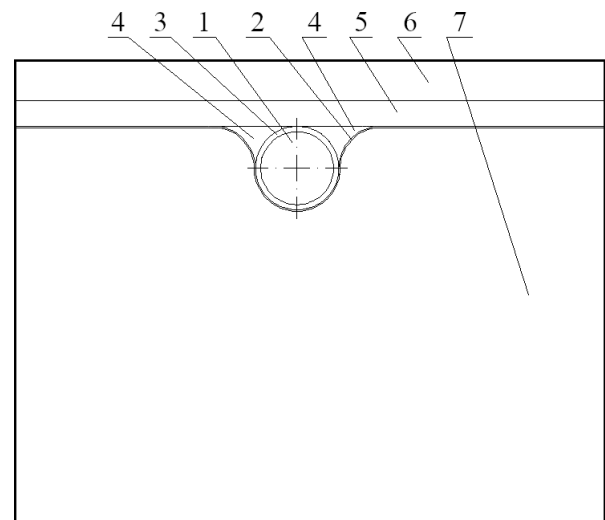


Рис. 1. Розрахункова область у центральному перерізі:

- 1 – вхід теплоносія до контура опалення;
- 2 – алюмінієва теплорозподільна пластинка завтовшки 0,2 мм;
- 3 – труба полімерна $\varnothing 16 \times 2$ мм;
- 4 – повітряний прошарок;
- 5 – клей для плитки (або підкладка під ламінат);
- 6 – керамічна плитка (або ламінат) завтовшки 8 мм;
- 7 – екструдований пінополістирол

Розрахунок проводився на основі системи рівнянь імпульсу й енергії. Система диференціальних рівнянь, що характеризують процес теплообміну та гідродинаміки в системі водяного підлогового опалення, складається з рівняння нерозривності, руху й енергії для рідини, а також рівняння теплопровідності для i -го шару підлоги. У моделі використовувалися наступні припущення:

- усі матеріали гомогенні, а їхні теплофізичні властивості зберігають постійні значення (табл.1);

Таблиця 1

Характеристики матеріалів системи підлогового опалення [9]

№ з/п	Найменування матеріалу	Товщина, мм	Густина, кг/м ³	Коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К)	Питома теплоємність c_p , кДж/(кг·К)
1	Екструдований пінополістирол	80	40	0,031	1,34
2	Алюміній	0,2	2700	200	920
3	Підкладка під ламінат	3	250	0,05	0,9
4	Ламінат	8	940	0,2	1,5
5	Клей для плитки	5	1600	0,47	0,84
6	Плитка керамічна для підлоги	8	2000	0,89	0,88
7	Труба РЕХ-А	2	1500	0,43	2,3

- вважається, що неврахування граничних ділянок повороту труб не вплине суттєво на результат розрахунку.

На поверхні підлоги було задано граничні умови третього роду з коефіцієнтом тепловіддачі $8 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$ і температурою навколишнього середовища $T_{\text{зов}}, \text{ К}$. Ступінь чорноти матеріалу $\epsilon = 0,9$.

На всіх бокових поверхнях (входу і виходу теплоносія) задавались умови симетрії. На нижній поверхні фрагменту було задано граничні умови постійної температури $283,15 \text{ К}$ ($10 \text{ }^\circ\text{C}$). Температура води на вході становить $T_{\text{в}}, \text{ К}$, а витрата – $Q_{\text{в}}, \text{ м}^3/\text{год}$.

Для валідації моделі теплої підлоги були використанні дані роботи [9]. Розрахунок виконано для стаціонарного режиму експлуатації системи підлогового опалення. Чисельне моделювання проводилося при ламінарному режимі течії теплоносія (води) в трубі.

Серію експериментів було проведено на лабораторному стенді в Інституті технічної теплофізики НАН України [9]. Дані експерименту порівнювались з даними теплофізичного моделювання (рис. 2).

Як видно з рисунку, розрахунок показує дещо вищі значення середнього за поверхнею теплового потоку, $\text{Вт}/\text{м}^2$, з поверхні ділянки. Це може бути пов'язано з теплофізичними властивостями матеріалів або з обмеженнями моделі. Однак, у цілому модель правильно описує процеси, що відбуваються в теплій підлозі сухого способу монтажу.

У роботі аналізується вплив таких параметрів як товщина теплоізоляції $\delta_{\text{ізол}}, \text{ м}$, витрата $q_{\text{в}}, \text{ м}^3/\text{год}$, та температура теплоносія $T_{\text{в}}, \text{ К}$. Розглянуто два варіанти типу фінішного покриття: керамічна плитка та ламінат (рис. 3...5).

За даними рис. 3 збільшення температури теплоносія на кожні 10 К за інших рівних умов збільшує тепловий потік з одиниці поверхні системи підлогового опалення приблизно на 13%

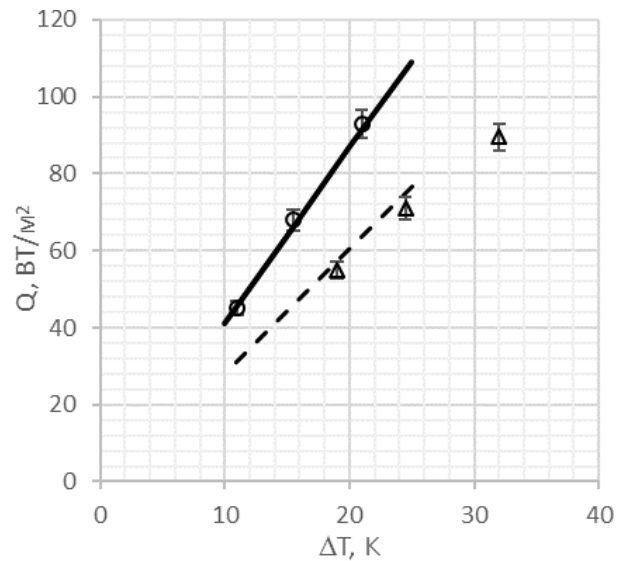


Рис. 2. Залежність густини теплового потоку з поверхні підлоги, $\text{Вт}/\text{м}^2$, від середньої різниці температури води та повітря в приміщенні $\Delta T, \text{ К}$:

- результати розрахунку при використанні ламінату;
- — — те ж при використанні керамічної плитки;
- Δ – результати експерименту з використанням ламінату;
- \circ – те ж з використанням керамічної плитки

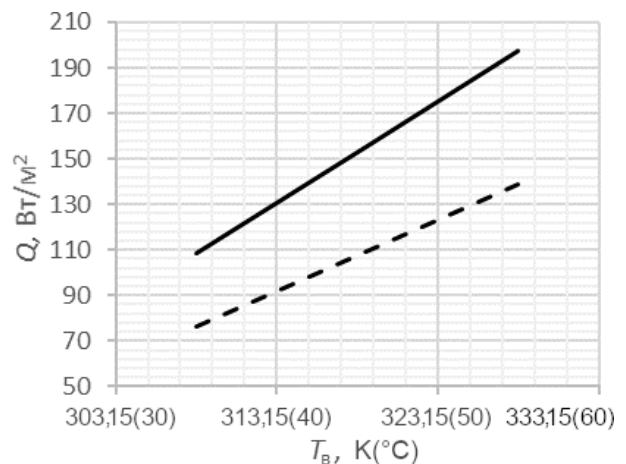


Рис. 3. Залежність густини теплового потоку з поверхні підлоги, $\text{Вт}/\text{м}^2$, від температури води в опалювальному контурі $T_{\text{в}}, \text{ К}$:

- результати розрахунку при використанні ламінату;
- — — те ж при використанні керамічної плитки

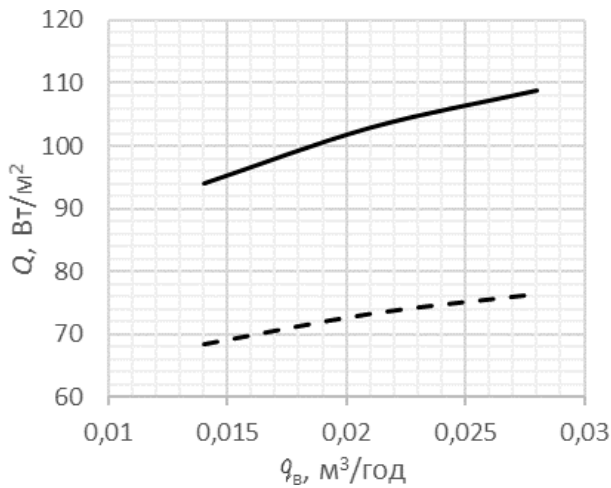


Рис. 4. Залежність густини теплового потоку Q , Вт/м², з одиниці поверхні теплої підлоги сухого способу монтажу від витрати води q_v , м³/год, в опалювальному контурі:
 - - - результати розрахунку при використанні ламінату;
 — — — те ж при використанні керамічної плитки

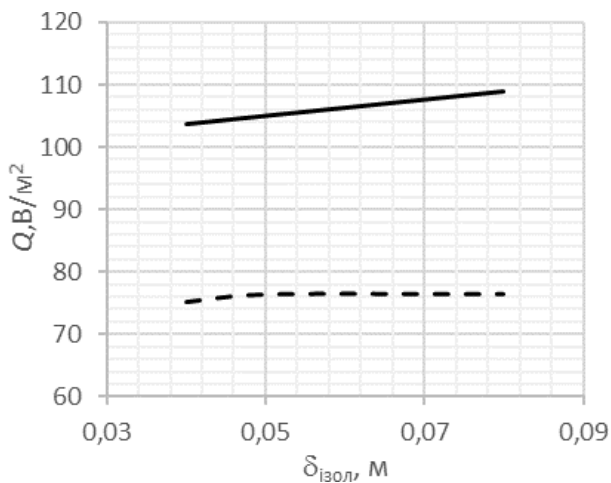


Рис. 5. Залежність густини теплового потоку Q , Вт/м², з одиниці поверхні теплої підлоги сухого способу монтажу від товщини плити пінополістиролу $\delta_{\text{ізол}}$, м:
 - - - результати розрахунку при використанні ламінату;
 — — — те ж при використанні керамічної плитки

при використанні керамічної плитки й 11 % при використанні ламінату як фінішного покриття.

За результатами досліджень можна зробити такі висновки: збільшення вдвічі витрати теплоносія за інших рівних умов збільшує тепловий потік з одиниці поверхні системи підлогового опалення на 13 % при використанні

керамічної плитки та 10 % при використанні ламінату як фінішного покриття.

Зі збільшенням удвічі товщини теплоізоляції під системою (з 40 мм до 80 мм) тепловий потік з поверхні підлоги за умови однакової температури на нижній межі області розрахунку збільшується на

- 4 % при використанні керамічної плитки;
- 1,6 % при використанні ламінату.

Результати показують можливість застосування розглянутих систем як у житлових, так і в нежитлових приміщеннях для енергоефективного опалення. Вирівнювання густини теплового потоку, Вт/м², за поверхнею підлоги завдяки алюмінієвій теплорозподільній пластині позитивно впливає на розподіл теплоти та зменшує термічні напруження у фінішному покритті.

Висновки. Систему підлогового опалення сухого монтажу з алюмінієвою теплорозподільною пластиною можливо використовувати в системах опалення житлових і нежитлових приміщень. Алюмінієва теплорозподільна пластина суттєво впливає на теплообмінні процеси в системі. Завдяки ній відбувається вирівнювання густини теплового потоку, Вт/м², у площині поверхні підлоги. Це позитивно впливає на розподіл теплоти та зменшує термічні напруження у фінішному покритті. Використання керамічної плитки збільшує загальну ефективність теплообміну системи із повітрям приміщення. Збільшення товщини плити пінополістиролу, м, збільшує величину густини теплового потоку, Вт/м², з поверхні теплої підлоги. До збільшення густини теплового потоку із поверхні підлоги також призводить збільшення температури теплоносія, К, та його витрати, м³/год.

Перспективи подальших досліджень. У подальшому інтерес представляє чисельне моделювання процесів теплообміну між теплоносієм (водою) та повітрям над фрагментом системи в нестационарній постановці, з метою визначення часу, с, виходу системи на квазістационарний режим.

Література

1. Weitzmann P. Modelling floor heating systems using a validated two dimensional ground-coupled numerical model / P. Weitzmann, J. Kragh, P. Roots, S. Svendsen // Building and Environment. – 2005. – Vol. 40. – No 2. – P. 153–163. doi: 10.1016/j.buildenv.2004.07.010.
2. Basok B. I. Computational modeling of the heat exchange between the heat-transport medium and the air in a room with floor heating / B. I. Basok, A. N. Nedbailo, M. P. Novitskaya, M. V. Tkachenko, S. M. Goncharuk // Journal of Engineering Physics and Thermophysic. – 2013. – Vol. 86. – No 2. – P. 418–423. doi:10.1007/s10891-013-0850-y.
3. Sattari S. A parametric study on radiant floor heating system performance./ S. Sattari., B. Farhanieh // Renewable Energy. – 2006. – Vol. 31. – No10. – P. 1617-1626. doi:10.1016/j.renene.2005.09.009.
4. Comini G. Thermal analysis of floor heating panels / G. Comini, C. Nonino. // Numerical Heat Transfer. Part A:

Applications. –1994. – Vol. 26. – No5. – P.537-550. doi: 10.1080/10407789408956008.

5. Yanfeng Liu. Study on heat transfer process for in-slab heating floor / Yanfeng Liu, Dengjia Wang, Jiaping Liu // *Building and Environment*. – 2012. – Vol. 54. – p. 77-85. doi:10.1016/j.buildenv.2012.02.007.

6. Xing Jin. A calculation method for the floor surface temperature in radiant floor system / Xing Jin, Xiaosong Zhang, Yajun Luo // *Energy and Buildings*. – 2010. – Vol. 42. – No10. – P. 1753-1758. doi:10.1016/j.enbuild.2010.05.011

7. Dongliang Zhang. Experimental and numerical analysis of lightweight radiant floor heating system / Dongliang Zhang, Ning Cai, Zijie Wang // *Energy and Buildings*. – 2013. – Vol. 61. – p. 260-266. doi:10.1016/j.enbuild.2013.02.016.

8. Werner-Juszczuk A. J. Experimental and numerical investigation of lightweight floor heating with metallised polyethylene radiant sheet / A. J. Werner-Juszczuk // *Energy and Buildings*. – 2018. – Vol. 177. – P. 23-32. doi:10.1016/j.enbuild.2018.08.011.

9. Basok B. Research into energy efficiency of the underfloor heating system, assembled dry / B. Basok, M. Tkachenko, A. Nedbailo, I. Bozhko // *Technology audit and production reserves*. – 2018.– Vol. 41. – No3/1. – P. 52-57. doi:10.15587/2312-8372.2018.135783.

10. Qiu L. Analyses on Two Paving Types of Floor Heating / L. Qiu, Q. Li. // *International Conference on Computer Distributed Control and Intelligent Environmental Monitoring*, Changsha. – 2011. – P. 1431-1433. doi:10.1109/CDCIEM.2011.527.

11. Thomas S. Model validation of a dynamic embedded water base surface heat emitting system for buildings / S. Thomas, P. Franck, P. André // *Building Simulation*. – 2011. – Vol. 4. – P. 41–48. doi:10.1007/s12273-011-0025-8

References

1. Weitzmann P., Kragh J, Roots P, Svendsen S. “Modelling floor heating systems using a validated two dimensional ground-coupled numerical model.” *Building and Environment*, Vol. 40, No 2, 2005, P. 153–163. doi: 10.1016/j.buildenv.2004.07.010.

2. Basok B. I., Nedbailo A. N., Novitskaya M. P., Tkachenko M. V., Goncharuk S. M. “Computational modeling of the heat exchange between the heat-transport medium and the air in a room with floor heating.” *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, Vol. 86, No 2, 2013, P. 418–423. doi:10.1007/s10891-013-0850-y.

3. Sattari S., Farhanieh B. “A parametric study on radiant floor heating system performance.” *Renewable Energy*, Vol. 31, No10, 2006, P. 1617-1626. doi:10.1016/j.renene.2005.09.009.

4. Comini G., Nonino C. “Thermal analysis of floor heating panels.” *Numerical Heat Transfer. Part A: Applications*, Vol. 26, No5, 1994, P.537-550. doi: 10.1080/10407789408956008.

5. Yanfeng Liu, Dengjia Wang, Jiaping Liu. “Study on heat transfer process for in-slab heating floor.” *Building and Environment*, Vol. 54, 2012, P. 77-85. doi:10.1016/j.buildenv.2012.02.007.

6. Xing Jin, Xiaosong Zhang, Yajun Luo. “A calculation method for the floor surface temperature in radiant floor system.” *Energy and Buildings*, Vol. 42, No10, 2010, P. 1753-1758. doi:10.1016/j.enbuild.2010.05.011

7. Dongliang Zhang, Ning Cai, Zijie Wang. “Experimental and numerical analysis of lightweight radiant floor heating system.” *Energy and Buildings*, Vol. 61, 2013, P. 260-266. doi:10.1016/j.enbuild.2013.02.016.

8. Werner-Juszczuk A. J. “Experimental and numerical investigation of lightweight floor heating with metallised polyethylene radiant sheet.” *Energy and Buildings*, 2018, Vol. 177, P. 23-32. doi:10.1016/j.enbuild.2018.08.011.

9. Basok B., Tkachenko M., Nedbailo A., Bozhko I. “Research into energy efficiency of the underfloor heating system, assembled dry.” *Technology audit and production reserves*, Vol. 41, No3/1, 2018, P. 52-57. doi:10.15587/2312-8372.2018.135783.

10. Qiu L., Li Q. “Analyses on Two Paving Types of Floor Heating.” *International Conference on Computer Distributed Control and Intelligent Environmental Monitoring*, Changsha, 2011, P. 1431-1433. doi:10.1109/CDCIEM.2011.527.

11. Thomas S., Franck P., André P. “Model validation of a dynamic embedded water base surface heat emitting system for buildings.” *Building Simulation*, 2011, Vol. 4, P. 41–48. doi:10.1007/s12273-011-0025-8

УДК 697.1

Теплофизическое моделирование и исследование теплотехнических характеристик тёплого водяного пола сухого способа монтажа

Б. И. Басок¹, М. П. Новицкая², С. М. Гончарук³

¹д.т.н., проф. Институт технической теплофизики НАН Украины, г. Киев, Украина, basok@itff.kiev.ua,
ORCID:0000-0002-8935

²к.т.н., с.н.с. Институт технической теплофизики НАН Украины, г. Киев, Украина, mmarina@ukr.net,
ORCID: 0000-0003-2867-101X

³к.т.н., ведущий научный сотрудник. Институт технической теплофизики НАН Украины, г. Киев, Украина,
goncharuk-s@ukr.net, ORCID: 0000-0002-5609-7337

Аннотация. Использование систем напольного отопления является эффективным способом достижения теплового комфорта пользователей в энергоэффективных зданиях. В работе приведены теоретические исследования теплотехнических параметров системы водяного тёплого пола сухого способа укладки. Система сухого способа монтажа, рассматриваемая в работе, состоит из утеплителя (пенополистирол) на котором расположены трубы системы отопления, контактирующие с алюминиевой теплораспределительной пластиной. Система покрыта сверху финишным покрытием. Расчёт проводился на основе системы уравнений импульса и энергии и выполнен для стационарного режима эксплуатации системы напольного отопления. Валидация модели выполнена с использованием результатов экспериментальных исследований. В работе сделаны выводы, что, данную конфигурацию системы напольного отопления, можно использовать в системах отопления жилых и нежилых помещений. Алюминиевая теплораспределительная пластина существенно влияет на теплообменные процессы в системе. Благодаря алюминиевым теплораспределительным пластинам происходит выравнивание теплового потока в плоскости поверхности пола, что положительно влияет на тепловое распределение и уменьшает термические напряжения в финишном покрытии. Использование керамической плитки увеличивает общую эффективность теплообмена системы с воздухом помещения. Увеличение толщины плиты пенополистирола увеличивает величину плотности теплового потока с поверхности тёплого пола. К увеличению плотности теплового потока с поверхности пола также приводит увеличение расхода и температуры теплоносителя.

Ключевые слова: тёплый пол, алюминиевая теплораспределительная пластина, численное моделирование, сухой способ монтажа.

UDC 697.1

Numerical simulation and study of thermal characteristics of a lightweight floor heating system

B. Basok¹, M. Novitska², S. Goncharuk³

¹Sc.D, professor. Institute of engineering thermophysics NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine, basok@itff.kiev.ua,
ORCID:0000-0002-8935

² PhD, senior researcher. Institute of engineering thermophysics NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine, mmarina@ukr.net,
ORCID: 0000-0003-2867-101X

³ PhD, leading researcher. Institute of engineering thermophysics NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine, goncharuk-s@ukr.net,
ORCID: 0000-0002-5609-7337

Abstract. The use of underfloor heating systems is an effective way to achieve thermal comfort for users in energy-efficient buildings. There are two kinds of such systems: traditional and dry-assembled. The first type is researched more deeply than the second one. The paper presents theoretical studies of the thermotechnical parameters of a water underfloor dry-assembled heating system. The design of the underfloor dry-assembled heating system, considered in the work, consists of a heat insulation (expanded polystyrene), on which the pipes of the heating system are located, in contact with an aluminum heat distribution plate. The system is covered with floor finishing. The calculation for a stationary operating mode of the floor heating system was carried out on the basis of a system of equations for momentum and energy. The model was validated using the results of experimental studies. The calculation results cause some overestimation of the experimental data, possibly, because of deviations in thermotechnical characteristics of materials. But the simulation model correctly estimates the behaviour of the system at change of its parameters. The paper concludes that this configuration of the underfloor heating system can be used in heating systems for residential and non-residential premises. The aluminum heat distribution plate significantly affects the heat transfer processes in the system. Due to the plate, the heat flux is made uniform in the plane of the floor surface, which has a positive effect on heat distribution and reduces thermal tension in the finish coating. The use of ceramic tiles increases the overall heat exchange efficiency of the system with the room air. An increase in the thickness of the expanded polystyrene board increases the value of the heat flux from the surface of the heated floor. An increase in the flow rate and temperature of the heat carrier also cause an increase in the density of heat flux from the floor surface.

Keywords: underfloor heating, aluminum heat distribution plate, numerical simulation, dry-assembly.

Надійшла до редакції / Received 31.10.2020