



РОЗРОБКА СИСТЕМИ КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ ПАСИВНОЇ СИСТЕМИ ОПАЛЕННЯ ЗАКРИТОГО ТИПУ

УДК 004:519.81

DOI: <https://doi.org/10.35546/2313-0687.2020.27.69-77>

Сокол Костянтин Ігорович,

аспірант кафедри програмних засобів і технологій,
Херсонський національний технічний університет, м. Херсон, Україна,
E-mail: kostya13sokol@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-5155-7202

Огнева Оксана Євгенівна,

кандидат технічних наук, доцент кафедри програмних засобів і технологій,
Херсонський національний технічний університет, м. Херсон, Україна,
E-mail: Oksana_Ognieva@meta.ua, ORCID ID: 0000-0001-6206-0285

Анотація. В умовах постійного зростання цін на енергоресурси, боротьби за поліпшення екології та зменшення частки використання викопних видів палива, актуальності набувають методи підвищення енергоефективності та енергозбереження. Одним із таких методів є застосування пасивних систем опалення – енергетичних систем, в яких процеси приймання, накопичення та використання сонячної енергії для опалення, здійснюються природним шляхом в архітектурно-будівельних елементах будівлі. Використання даних систем дозволяє зменшувати витрати енергоресурсів на опалення та охолодження будівлі до 80 %.

У статті розглянуто пасивні системи опалення закритого типу, їх особливості, основні параметри, переваги над звичайними системами опалення, методи їх моделювання та оптимізації, а також, можливість використання систем комп'ютерного аналізу для створення моделей пасивних систем опалення закритого типу.

Метою даного дослідження є розробка системи комп'ютерного моделювання для оптимізації параметрів пасивної системи опалення закритого типу.

Основні результати дослідження. Запропоновано концептуальну схему оптимізації параметрів пасивної системи опалення закритого типу з використанням систем комп'ютерного моделювання. Показано принцип роботи даної схеми, вказано її вхідні та вихідні параметри. Розглянута схема дозволяє отримувати оптимальні значення основних параметрів системи пасивного опалення, а використання методів комп'ютерного моделювання максимально підвищує точність розрахунків та надає можливість імітації будь-яких умов для детального дослідження розглянутих систем.

Науковою новизною є запропонована концептуальна схема, а зокрема, використання моделювання за допомогою методу обчислювальної гідродинаміки для подальшого аналізу результатів та оптимізації параметрів.

Ключові слова: пасивні системи опалення, моделювання, оптимізація, енергоефективність, теплопередача.

Постановка проблеми. Такі проблеми як постійне підвищення цін на енергоресурси, їх економія, зменшення шкідливих викидів у атмосферу планети, а також, комфорту життя людини ніколи не втрачуть своєї актуальності. Тому дослідження пасивних систем опалення, а саме, процесів теплопередачі в них з метою вирішення всього перерахованого вище зараз є доцільним як ніколи.

Пасивна система опалення – це енергетична система, в якій процеси приймання, накопичення та використання сонячної енергії для опалення, здійснюються природним шляхом в архітектурно-будівельних елементах будівлі. Закритою пасивною системою опалення називають таку, що використовує непрямі методи передачі теплової сонячної енергії до споживача, наприклад, стіну, що виступає у ролі акумулятора теплоти.

Дослідження у сфері пасивних систем опалення не припиняються від 1881 р., коли була запатентована перша подібна система. Останніми роками ця тема залишається популярною, що показують роботи [1-7], де представлені принципи моделювання різних видів таких систем. Зокрема, актуальність зберігається і через появу більш потужних машин, що дозволяють розробляти комп'ютерні моделі, які дають змогу отримувати більш точні результати та виконувати швидкі розрахунки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідженням та створенням методів розрахунку та проектування пасивних систем опалення займалися такі вчені як Ольгей, Андерсен, Марзія., Лебенс, Балкомб, Байер, Даффі, Бекмен, Мхітарян, Чірась, Бейнбрідж та інші.

Сучасні дослідження одо конструктивних особливостей пасивних систем опалення досліджували Матушка, Ана Брига Са, Хосе Боавентура-Кунья, Жоао-Карлос Ланзінья, Анабела Пайва, Хеленіс М. Сахт, Луїс Браганса, Мануела Алмейда, Розана Карам.

У роботах авторів Челсі Рене Девіс, Чжицзе Ін, Відя Айся, Джоунд Хендрарсакті, Станко Щраков, Антон Стоїлов, Ягоди Блотні, Магдаліни Немш, Шашикант Павар та інших, проведені дослідження процесів теплопередачі в пасивних системах опалення з використанням методів комп'ютерного моделювання, зокрема, методу кінцевих різниць, методу кінцевих елементів та методу обчислювальної гідродинаміки (computational fluid dynamic (CFD)), заснованому, в більшості випадків, на методи кінцевих об'ємів.

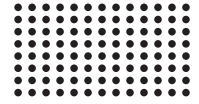
Зважаючи на кількість досліджень проведених узагалі та зокрема в останні роки, можна зробити висновок про те, що дослідження у сфері пасивних системах опалення не тільки не припиняються, але й отримали нове дихання з появою можливості застосування комп'ютерного аналізу до них. Тим не менш, залишається ще багато питань, що потребують глибшого вивчення, зокрема, проблема оптимізації параметрів пасивних систем опалення, вирішення якої буде розглянуто в даному дослідженні.

Мета дослідження. Пасивні системи опалення можуть стати одним з елементів вирішення проблеми надмірної залежності від викопних енергоресурсів, адже працюють за рахунок енергії сонця. Для підвищення ефективності використання таких систем, необхідно займатися оптимізацією та до кожного конкретного випадку використання підходити індивідуально. Для того, щоб отримувати максимально наближені дані про перспективу використання пасивних систем опалення, потрібно проводити моделювання їх поведінки за певних умов. Найкращим засобом для цього є аналіз за допомогою комп'ютерних систем (КС).

Отже, метою даного дослідження є розробка системи комп'ютерного моделювання для оптимізації параметрів пасивної системи опалення закритого типу.

Виклад матеріалу дослідження. Розрізняють активні і пасивні системи сонячного теплопостачання будинків. Характерною ознакою активних систем є наявність колектора сонячної енергії, акумулятора теплоти, додаткового джерела енергії, трубопроводів, теплообмінників, насосів або вентиляторів і пристроїв для автоматичного контролю і керування. У пасивних системах роль сонячного колектору й акумулятора теплоти зазвичай виконують самі огорожувальні конструкції будинку, а рух теплоносія (повітря) здійснюється за рахунок природної конвекції без застосування вентилятора [8-9].

Закрита система пасивного опалення – стіна Тромбе показана, на рис. 1 є одним з видів пасивної системи опалення та поєднує у собі об'єднує функції колектору та акумулятора, і також є частиною огорожувальних конструкцій будівлі. Частина південної застлана, за склом – масивна стіна з твердого матеріалу або резервуарів води, пофарбована чорним для кращого поглинання сонячної радіації. Тепло переноситься в приміщення



шляхом випромінювання та конвекції від акумулюючої стіни з боку кімнати, та шляхом примусової або природної конвекції кімнатного повітря через простір між склінням та стіною. Для підвищення ефективності даної системи опалення, у періоди низької інтенсивності сонячної радіації (уночі та за похмурої погоди) необхідно використовувати рухливу ізоляцію для скління в усіх видах клімату, крім м'якого [9].

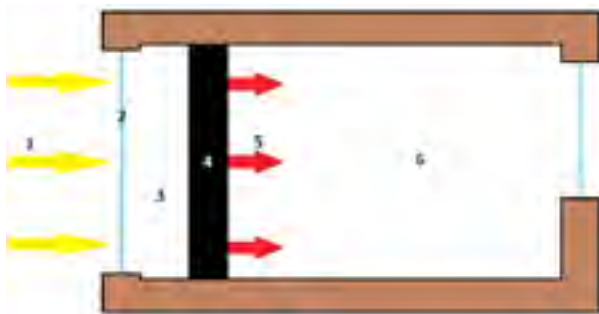


Рис. 1 – Схема пассивної системи опалення закритого типу – стіни Тромбе:

- 1 – сонячні промені; 2 – зовнішнє скління;
- 3 – повітряний прошарок; 4 – теплоакumuлююча стіна;
- 5 – передача тепла від стіни до простору кімнати;
- 6 – простір кімнати

Додатковою перевагою такої системи є те, що її можна використовувати не тільки для опалення, але

й для охолодження будівлі в теплу пору року. У такому разі, принцип роботи змінюється: сонячна ізоляція прибирається в нічний час для того, щоб акумулююча стіна максимально охолодилася, після сходу сонця, ізоляція повертається на місце і не дає стіні нагріватися під дією прямих сонячних променів, а сама стіна у цей час охолоджує кімнату за рахунок накопиченої вночі енергії.

Основними змінними параметрами стіни Тромбе, що стануть вхідними для схеми оптимізації є: кількість шарів скління; товщина повітряного прошарку між склінням і акумулюючою стіною; товщина акумулюючої стіни та матеріал, з якого вона побудована. За допомогою оптимізації цих параметрів можна досягти найкращої енергоефективності для будівлі у будь-якій кліматичній зоні та будь-яких геометричних розмірів. Також, за рахунок зміни цих параметрів, можна налаштувати систему для будь-якої кліматичної зони, що робить систему надзвичайно універсальною.

Економія енергоресурсів для такої системи опалення може становити до 80 % на опалення та до 80 % на охолодження, це підтверджують джерела [9] та моделювання такої системи у середовищі MATLAB Simulink для кліматичної зони – м. Херсон. На рис. 2 представлено порівняння графіків розподілу температур у будівлі без та з наявністю пассивної системи опалення.

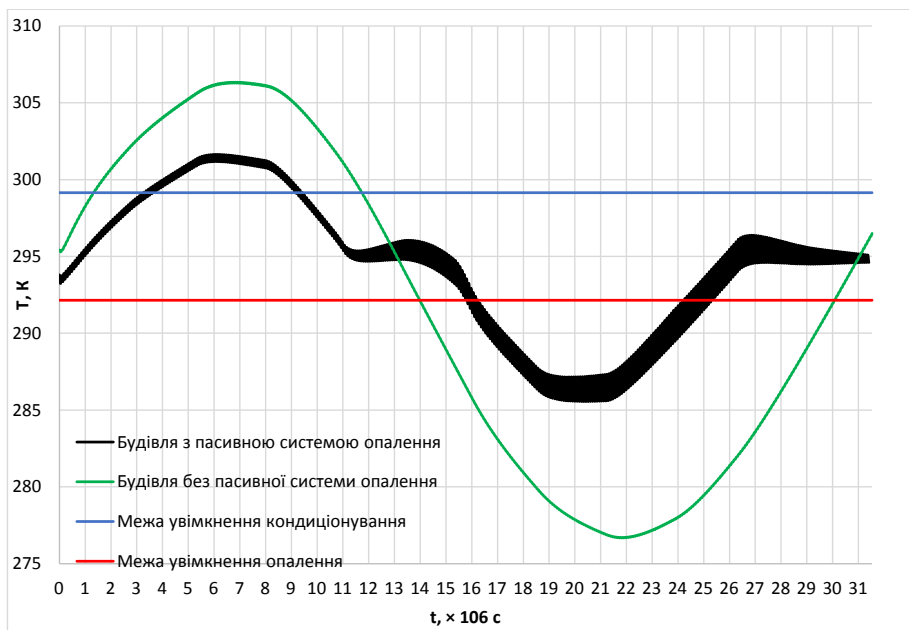
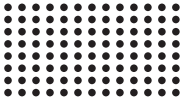


Рис. 2 – Порівняння розподілу температур впродовж року в будівлі без та з наявністю пассивної системи опалення



Найбільш розповсюдженим у питаннях дослідження перенесення потоків, зокрема теплових, методом комп'ютерного моделювання, став метод обчислювальної гідродинаміки, що використовує дискретизацію за методом кінцевих об'ємів. Цей метод заснований на тому, що багато фізичних законів є законами збереження: те, що потрапляє в одну клітину з одного боку, повинно залишати ту саму клітину з іншого боку. Слідуючи цій ідеї, отримується формулювання, що складається з рівнянь збереження потоку, визначених у середньому значенні для клітин [10-18].

Для пасивних систем опалення, метод обчислювальної гідродинаміки має наступні основні кроки:

1. Попередня обробка. Етап попередньої обробки включає в себе створення геометрії пасивної системи опалення, що буде досліджуватися в майбутньому. Складні предмети можуть бути представлені простими геометричними фігурами (елементами).

2. Дискретизація. Пасивна система опалення розділяється на безліч дрібних елементів, з'єднаних вузлами. Сітка кінцевих елементів, як правило, генерується програмою препроцесора. Опис сітки складається з декількох масивів, основними з яких є вузлові координати та елементи зв'язку.

3. Представлення даних про властивості складових/матеріалів.

4. Визначення граничних умов.

5. Розв'язання глобальної системи рівнянь. Для кожного елемента, що утворився під час дискретизації існує своє рівняння, усі вони разом утворюють систему рівнянь, що необхідно вирішити для отримання необхідних результатів.

6. Подальша обробка. Отримавши необхідні дані про розподіл температур, амплітуду добових коливань температур, часову затримку розподілу тепла через акумулюючу стінку тощо, можна проводити подальший аналіз і робити необхідні висновки.

Для аналізу теплових зон зручно використовувати графічні результати моделювання, де кожна з визначених температурних зон відповідатиме певному кольору. Набір таких зон створить теплову карту з легендою, за якою можна буде легко зорієнтуватися в результатах [11-12, 19].

Запропоновану концептуальну схему оптимізації параметрів пасивної системи опалення закритого типу, яка дозволить максимально точно змодельовати процеси

теплопередачі та проаналізувати всі необхідні параметри, наведено на рис. 3. Принцип її роботи наступний:

1. Дослідник задає вхідні дані, що не будуть змінюватися впродовж дослідження: кліматичні дані; матеріал, з якого побудована акумулююча стіна. Матеріал повинен мати відносно високу густину та теплопровідність для того, щоб виконувати функцію акумулятора (найбільш розповсюджений матеріал для будівництва акумулюючих стін – залізобетон).

2. Дослідник задає діапазони вхідних параметрів системи опалення: кількість шарів скління; товщина повітряного прошарку між склінням і акумулюючою стіною; товщина акумулюючої стіни. Вибір діапазонів значень ґрунтується на наступному: кліматичних умовах, для яких буде проводитися дослідження (чим холодніший клімат – тим більше шарів скління та товще акумулююча стіна); архітектурних особливостях будівлі (акумулююча стіна має межу мінімальної товщини через те, що крім опалювальної функції ще й несе навантаження); особливостях розпорядку дня людей, що будуть мешкати в оселі (чим товще акумулююча стіна, тим більшою буде затримка у передачі тепла від неї до кімнати).

3. Оптимізація виконується поступово для кожного з параметрів. Наприклад, для того, щоб отримати оптимальну товщину повітряного прошарку, необхідно прийняти значення інших параметрів за константу, і поступово виконати дослідження для всіх значень товщини повітряного прошарку з заданого діапазону.

4. Пасивна система опалення з обраними параметрами моделюється за допомогою CFD.

5. Проводиться симуляція роботи пасивної системи опалення впродовж року. На цьому етапі отримується графік розподілу температур всередині будівлі впродовж року.

6. Графік розподілу температур аналізується та розраховуються енерговитрати на опалення та кондиціонування, а також, сумарні енерговитрати.

7. Будується залежність сумарних річних енерговитрат від кожного значення обраного діапазону параметрів. Ця залежність перевіряється на наявність екстремумів, значення параметру у точці екстремуму і буде оптимальним.

8. У разі знаходження екстремуму, дослідження обраного параметру припиняється, оптимальне значення зберігається та використовується для дослідження інших параметрів.



Рис. 3 – Концептуальна схема оптимізації параметрів пасивної системи опалення закритого типу

9. Починається дослідження наступного параметру.

Подібна схема без застосування моделювання за допомогою CFD використовувалася в дослідженні пасивної системи опалення закритого типу для кліматично зони – м. Херсон. За результатами моделювання у середовищі MATLAB Simulink, при сталій кількості шарів скління та товщині акумулюючої стіни, оптимальною товщиною повітряного прошарку з діапазону від 1 до 5 см виявилось – 2 см. Саме при такому значенні загальні енергопотреби будівлі виявилися мінімальними.

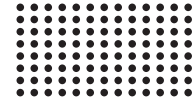
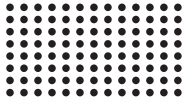
КС, яка реалізує використання запропонованої концептуальної схеми оптимізації параметрів пасивної системи опалення закритого типу дозволить прийняти математично обґрунтовані рішення щодо покращення енергоефективності будівель. Використання сучасних інформаційних технологій дозволить підвищити точність розрахунків та надасть змогу більш наочно представити переваги пасивних систем опалення.

Висновки

1. Закриті пасивні системи опалення дозволяють значно скоротити витрати енергоресурсів на опалення і кондиціонування будівлі та загалом підвищують комфорт мешканців. Концепція таких систем опалення, робить їх універсальними і можливими для використання в будь якому кліматі.

2. Використання методу обчислювальної гідродинаміки для дослідження процесів теплопередачі у пасивних системах опалення дозволить максимально точно змоделювати процеси теплопередачі та проаналізувати всі необхідні параметри всередині як власне системи опалення так і простору будівлі, що нею опалюється.

3. Розробка комп'ютерної системи оптимізації параметрів пасивної системи опалення закритого типу на основі запропонованої концептуальної схеми дозволить підібрати параметри пасивної системи опалення для максимально вигідного її використання з точки зору зменшення енерговитрат.

**СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ:**

1. Olenets M., Piotrowski J.Z, Stroj A. Mathematical Description of Heat Transfer and Air Movement Processes in Convective Elements of a Building's Passive Solar Heating Systems. *Energy Procedia*. 2014. 57. Pp. 2070–2079. DOI: 10.1016/j.egypro.2014.10.172.
2. Piotrowski J.Z., Story A., Olenets M. Mathematical modelling of the steady state heat transfer processes in the convective elements of passive solar heating systems. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2013. Vol. 13, No 3. Pp. 394–400. DOI: 10.1016/j.acme.2013.02.002
3. Рахимова К.К., Турсунов Ш.С., Ураков К.Х., Дамаев Н.К. Математическая модель расчета температурного поля теплоаккумулирующей стенки энергоэффективных зданий с альтернативным источником энергии. *Энергетика. Секция III. Каршинский государственный университет. Карші*, 2019. с. 271–274.
4. Kostikov S.A., Yiqiang J., Grinkrug M.S. Mathematical Model of a Trombe Wall in Combined Heat Supply System. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol 753, Chap 1. 753:022018. DOI: 0.1088/1757-899x/753/2/022018
5. Aisya V., Hendrarsakti J. Computational and analytical study of Trombe wall configurations within Bandung weather condition. *AIP Conference Proceedings*, 1984, 02 AIP Conference Proceedings 1984. 2018. 020019. DOI: 10.1063/1.5046603
6. Błotny J., Nemś M. Analysis of the Impact of the Construction of a Trombe Wall on the Thermal Comfort in a Building Located in Wrocław, Poland. *Faculty of Mechanical and Power Engineering, Wrocław University of Science and Technology, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50–370 Wrocław, Poland, Atmosphere*. 2019. No 10(12), 761. DOI: 10.3390/atmos10120761
7. Shashikant P., Kishan N. Numerical Analysis of House with Trombe Wall. *International Journal of Engineering and Technology*. 2016. Vol 3(9).
8. Основні положення при проектуванні пасивних та активних теплових сонячних систем URL: https://studopedia.com.ua/1_14753_lektsiya-osnovni-polozhennya-pri-proektu-vanni-pasivnih-ta-aktivnih-teplovih-sonyachnih-sistem.html (дата звернення: 15.01.2021).
9. Duffie J.A., Beckman W.A. *Solar Engineering of Thermal Processes*. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc. 2013. 910 p.
10. Mohammed U.A., Alibaba H.Z. Application of Bioclimatic Design Strategies to Solve Thermal Discomfort in Maiduguri Residences, Borno State Nigeria. *Imperial Journal of Interdisciplinary Research*. 2018. Vol. 4, Issue 1. Pp. 227–233.
11. Udoewa V., Kumar V. Computational Fluid Dynamics. In book: *Applied Computational Fluid Dynamics*. 2012. DOI: 10.5772/28614.
12. Ghani A., Mohammed M.F. Fundamentals Of Computational Fluid Dynamics. In book: *Sterilization Of Food In Retort Pouches*, Chapter: 4, Project: *Food Processing Engineering*. 2006. Pp. 33–44. DOI: 10.1007/0-387-31129-7_4.
13. Milbradt P., Abed W. Generalized stabilization techniques in computational fluid dynamics. URL: https://www.researchgate.net/publication/266465949_GENERALIZED_STABILIZATION_TECHNIQUES_IN_COMPUTATIONAL_FLUID_DYNAMICS (дата звернення: 15.01.2021).
14. Chunchula B., Santhosh G. CFD Analysis of Heat Transfer Enhancement by Using Passive Technique in Heat Exchanger. *International Journal of Recent advances in Mechanical Engineering*. 2015. No 4. Pp. 99–111. DOI: 10.14810/ijmech.2015.4308. Краще джерело у діапазоні 2016–2021
15. Okita W., Reno M., Peres A., Resende J. Heat transfer analyses using computational fluid dynamics in the air blast freezing of guava pulp in large containers. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*. 2013. No 30. Pp. 811–824. DOI: 10.1590/S0104-66322013000400013.
16. Hosain M.L. Fluid Flow and Heat Transfer Simulations for Complex Industrial Applications: From Reynolds Averaged Navier-Stokes towards Smoothed Particle Hydrodynamics. *Mälardalen University Press Dissertations. Mälardalen University*. 2018. Vol 282.
17. Kocheril R., Elias J. CFD simulation for evaluation of optimum heat transfer rate in a heat exchanger of an internal combustion engine. *International Journal for Simulation and Multidisciplinary Design Optimization. Int. J. Simul. Multidisci. Des. Optim.* 2020. 11, 6. DOI: 10.1051/smdo/2019017.
18. What's The Difference Between FEM, FDM, and FVM? URL: <https://www.machinedesign.com/3d-printing-cad/fea-and-simulation/article/21832072/whats-the-difference-between-fem-fdm-and-fvm.html> (дата звернення: 15.01.2021).
19. Falguni M., Hrishabh J. Finite element method: An overview. *JDMS*. 2016. 15. Pp. 38–41.



DEVELOPMENT OF A COMPUTER MODELING SYSTEM FOR OPTIMIZATION OF PARAMETERS OF A PASSIVE CLOSED HEATING SYSTEM

Sokol Kostiantyn,

Ph.D. student of Software Tools and Technologies Department,
Kherson National Technical University, Kherson, Ukraine,
e-mail: kostya13sokol@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-5155-7202

Ohnieva Oksana,

Ph.D., Associate Professor of Software Tools and Technologies Department,
Kherson National Technical University, Kherson, Ukraine,
e-mail: Oksana_Ognieva@meta.ua, ORCID ID: 0000-0001-6206-0285

Abstract. In the conditions of constant growth of prices for energy resources, struggle for improvement of ecology and reduction of share of use of fossil fuels, methods of increase of energy efficiency and energy saving become actual. One of such methods is the use of passive heating systems – energy systems in which the processes of collection, accumulation and use of solar energy for heating are carried out naturally in the architectural and building elements of the building. The use of these systems allows to reduce energy costs for heating and cooling of the building up to 80 %.

The article considers passive closed heating systems, their features, basic parameters, advantages over conventional heating systems, methods of their modeling and optimization, as well as the possibility of using computer analysis systems to create models of passive closed heating systems.

The purpose of this study is to develop a computer simulation system to optimize the parameters of a passive closed heating system.

The main results of the study. A conceptual scheme for optimizing the parameters of a passive closed heating system using computer simulation systems is proposed. The principle of operation of this scheme is shown, its input and output parameters are specified. The considered scheme allows to receive optimum values of the basic parameters of passive heating system, and use of methods of computer modeling maximizes accuracy of calculations and gives the chance of simulation of any conditions for detailed research of the considered systems.

The scientific novelty is the proposed conceptual scheme, and in particular, the use of modeling using the method of computational fluid dynamics for further analysis of results and optimization of parameters.

Key words: *passive heating systems, modeling, optimization, energy efficiency, heat transfer.*

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ПАССИВНОЙ СИСТЕМЫ ОТОПЛЕНИЯ ЗАКРЫТОГО ТИПА

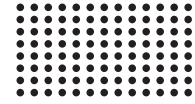
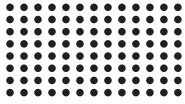
Сокол Константин Игоревич,

аспирант кафедры программных средств и технологий,
Херсонский национальный технический университет, Херсон, Украина;
e-mail: kostya13sokol@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-5155-7202

Огнева Оксана Евгеньевна,

кандидат технических наук, доцент кафедры программных средств и технологий,
Херсонский национальный технический университет, Херсон, Украина;
e-mail: Oksana_Ognieva@meta.ua, ORCID ID: 0000-0001-6206-0285

Аннотация. В условиях постоянного роста цен на энергоресурсы, борьбы за улучшение экологии и уменьшения доли использования ископаемых видов топлива, актуальность приобретают методы повышения энергоэффективности и энергосбережения. Одним из таких методов является применение пассивных систем отопления – энерге-



тических систем, в которых процессы приема, накопления и использования солнечной энергии для отопления, осуществляются естественным путем в архитектурно-строительных элементах здания. Использование данных систем позволяет уменьшать затраты энергоносителей на отопление и охлаждение здания до 80 %.

В статье рассмотрены пассивные системы отопления закрытого типа, их особенности, основные параметры, преимущества над обычными системами отопления, методы их моделирования и оптимизации, а также возможность использования систем компьютерного анализа для создания моделей пассивных систем отопления закрытого типа.

Целью данного исследования является разработка системы компьютерного моделирования для оптимизации параметров пассивной системы отопления закрытого типа.

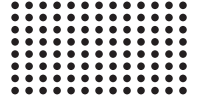
Основные результаты исследования. Предложена концептуальная схема оптимизации параметров пассивной системы отопления закрытого типа с использованием систем компьютерного моделирования. Показано принцип работы данной схемы, указано ее входные и выходные параметры. Рассмотренная схема позволяет получать оптимальные значения основных параметров системы пассивного отопления, а использование методов компьютерного моделирования максимально повышает точность расчетов и дает возможность имитации любых условиях для детального исследования рассматриваемых систем.

Научной новизной является предложенная концептуальная схема, в частности, использование моделирования с помощью метода вычислительной гидродинамики для дальнейшего анализа результатов и оптимизации параметров.

Ключевые слова: пассивные системы отопления, моделирование, оптимизация, энергоэффективность, теплопередача.

REFERENCES:

1. Olenets, M., Piotrowski, J.Z., & Stroj, A. (2014). Mathematical Description of Heat Transfer and Air Movement Processes in Convective Elements of a Building's Passive Solar Heating Systems. *Energy Procedia*. 57, 2070–2079. DOI: 10.1016/j.egypro.2014.10.172.
2. Piotrowski, J.Z., Story, A., & Olenets M. (2013). Mathematical modelling of the steady state heat transfer processes in the convective elements of passive solar heating systems. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 13, 3, 394–400. DOI: 10.1016/j.acme.2013.02.002
3. Rakhimova, K.K., Tursunov, Sh.S., Urakov, K.Kh., & Damaev, N.K. (2019). Mathematical model for calculating the temperature field of the heat-accumulating wall of energy-efficient buildings with an alternative energy source. *Energy*. Section III. Karshi State University, Karshi. 271–274. (in Russian).
4. Kostikov, S.A., Yiqiang, J., & Grinkrug, M.S. (2020). Mathematical Model of a Trombe Wall in Combined Heat Supply System. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 753, 1, 753:022018. DOI: 10.1088/1757-899x/753/2/022018
5. Aisya, V., & Hendrarsakti, J. (2018). Computational and analytical study of Trombe wall configurations within Bandung weather condition. *AIP Conference Proceedings*, 1984, 02 AIP Conference Proceedings 1984. 020019. DOI: 10.1063/1.5046603
6. Błotny, J., & Nemś, M. (2019). Analysis of the Impact of the Construction of a Trombe Wall on the Thermal Comfort in a Building Located in Wrocław, Poland. *Faculty of Mechanical and Power Engineering, Wrocław University of Science and Technology, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50–370 Wrocław, Poland, Atmosphere*. 10(12), 761. DOI: 10.3390/atmos10120761
7. Shashikant, P., & Kishan, N. (2016). Numerical Analysis of House with Trombe Wall. *International Journal of Engineering and Technology*. 3(9).
8. Basic provisions in the design of passive and active thermal solar systems URL: https://studopedia.com.ua/1_14753_lektsiya--osnovni-polozhennya-pri-proektu-vanni-pasivnih-ta-aktivnih-teplovih-sonyachnih-sistem.html (in Russian).
9. Duffie, J.A., & Beckman, W.A. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes*. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc.
10. Mohammed, U.A., & Alibaba, H.Z. (2018). Application of Bioclimatic Design Strategies to Solve Thermal Discomfort in Maiduguri Residences, Borno State Nigeria. *Imperial Journal of Interdisciplinary Research*. 4, 1, 227–233.
11. Udoewa, V., & Kumar, V. (2012). Computational Fluid Dynamics. In book: *Applied Computational Fluid Dynamics*. DOI: 10.5772/28614.
12. Ghani, A., & Mohammed, M.F. (2006). Fundamentals Of Computational Fluid Dynamics. In book: *Sterilization Of Food In Retort Pouches*, Chapter: 4, Project: Food Processing Engineering. 33–44. DOI: 10.1007/0-387-31129-7_4.
13. Milbradt, P., & Abed, W. Generalized stabilization techniques in computational fluid dynamics. URL: https://www.researchgate.net/publication/266465949_GENERALIZED_STABILIZATION_TECHNIQUES_IN_COMPUTATIONAL_FLUID_DYNAMICS
14. Chunchula, B., & Santhosh G. (2015). CFD Analysis of Heat Transfer Enhancement by Using Passive Technique in Heat Exchanger. *International Journal of Recent advances in Mechanical Engineering*. 4, 99–111. DOI: 10.14810/ijmech.2015.4308.
15. Okita, W., Reno, M., Peres, A., & Resende, J. (2013). Heat transfer analyses using computational fluid dynamics in the air blast freezing of guava pulp in large containers. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*. 30, 811–824. DOI: 10.1590/S0104-66322013000400013.



16. Hosain, M.L. (2018). Fluid Flow and Heat Transfer Simulations for Complex Industrial Applications: From Reynolds Averaged Navier-Stokes towards Smoothed Particle Hydrodynamics. Mälardalen University Press Dissertations. Mälardalen University. 282.
17. Kocheril, R., & Elias, J. (2020). CFD simulation for evaluation of optimum heat transfer rate in a heat exchanger of an internal combustion engine. International Journal for Simulation and Multidisciplinary Design Optimization. Int. J. Simul. Multidisci. Des. Optim. 11, 6. DOI: 10.1051/smdo/2019017.
18. What's The Difference Between FEM, FDM, and FVM? URL: <https://www.machinedesign.com/3d-printing-cad/fea-and-simulation/article/21832072/whats-the-difference-between-fem-fdm-and-fvm.html>
19. Falguni, M., & Hrishabh, J. (2016). Finite element method: An overview. JDMS. 15, 38–41.