

АННОТАЦІЯ

Вакуленко Д. І. Регенеративні реверсивні пристрої для енергоефективної децентралізованої вентиляції приміщень. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія» (19 – Архітектура та будівництво). – Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, 2025 р.

Основний зміст дисертаційної роботи. Дисертаційна робота присвячена дослідженню пристроїв для створення енергоефективного мікроклімату в приміщеннях без суттєвого втручання в їх інтер'єр, а саме регенеративних реверсивних децентралізованих пристроїв. У даній дисертаційній роботі проведено комплексне дослідження теплофізичних характеристик конструкції регенеративного вентиляційного пристрою та їхнього впливу на ефективність теплоутилізації. Розроблено математичну модель роботи реверсивного регенератора теплоти, що дозволяє оцінити основні теплові процеси, які відбуваються під час змінного напрямку потоку повітря.

У ході експериментальних досліджень визначено локальні значення коефіцієнта тепловіддачі у тонких трубках діаметром 0,003 м та 0,008 м, що є характерним діапазоном еквівалентного діаметра каналів у реверсивному регенераторі. На основі проведеного експерименту одержано авторську формулу критерію Нуссельта, яка описує процеси теплопередачі в тонких каналах реверсивного регенератора.

У роботі розроблено методику визначення ефективності роботи реверсивного регенератора на основі його конструктивних та експлуатаційних параметрів. В основі даної методики лежить залежність числа Нуссельта, отриманна експериментальним чином в ході даної роботи. Отримані результати дозволяють обґрунтувати рекомендації щодо оптимізування конструкції регенератора для підвищення ефективності утилізації теплоти

втяжного повітря.

Запропонована методика може бути використана іншими науковцями та дослідниками для подальшого вивчення процесів теплопередачі в реверсивних регенераторах теплоти втяжного повітря. Вона також є корисною для студентів та аспірантів, які проводять дослідження в галузі енергоефективних технологій, будівельної теплофізики та вентиляції. Крім того, отримані результати можуть бути застосовані в освітніх програмах підготовки фахівців у сфері енергоефективного будівництва та кліматичних систем.

На основі аналізу отриманих даних сформульовано практичні рекомендації для виробника щодо вдосконалення конструкції пристрою, зокрема оптимізування геометричних параметрів каналів реверсивного регенератора, що сприятиме підвищенню енергоефективності та загальної продуктивності пристрою.

У першому розділі розглянуто сучасні підходи підвищення енергоефективності децентралізованих реверсивних вентиляційних пристроїв та їхню роль у створенні комфортного мікроклімату в будівлях. Такі системи по чергово працюють то на приплив, протягом 70 с, то на видалення, протягом того ж часу. Особливу увагу приділено механізмам утилізації теплоти у децентралізованих вентиляційних пристроях, що реалізуються через рекуперацію та регенерацію теплоти втяжного повітря.

За результатами аналізу сформульовано основні напрямки підвищення ефективності утилізації теплоти втяжного повітря у децентралізованих регенеративних реверсивних пристроях, зокрема оптимізування їх конструктивних характеристик.

У другому розділі представлено теоретичні дослідження нестационарних теплообмінних процесів у реверсивному регенераторі теплоти, що використовується в реверсивних вентиляційних пристроях. Для оцінювання ефективності роботи регенеративного пристрою було визначено температурні коефіцієнти ефективності утилізації теплоти втяжного повітря за трьома підходами. Перший підхід базується на використанні формули для

тепловіддачі при ламінарному русі в трубках (який є характерним для тонких каналів регенеративних теплоутилізаторів) М. О. Міхеєва для розв'язання системи рівнянь Фур'є-Кірхгофа та балансу теплоти, що описує процеси взаємодії потоку повітря та поверхонь реверсивного регенератора. Другий підхід передбачає застосування формули коефіцієнта тепловіддачі, що враховує критерій Грасгофа. Третій підхід – моделювання тепломасообмінних процесів у реверсивному регенераторі теплоти методами обчислювальної гідродиніміки із використанням рівнянь конвекції-дифузії та Нав'є-Стокса. На основі чисельних експериментів за даними підходами визначено значення температурного коефіцієнта ефективності на рівні 58,5 %, 33,1 % та 97,4 %. Розбіжність отриманих значень за згаданими підходами становить від 39,94 % до 194,26 %, що вказує на необхідність експериментального уточнення коефіцієнта тепловіддачі в тонких каналах, характерних для реверсивних регенераторів децентралізованих вентиляційних пристроїв.

Характерними розмірами каналів реверсивного регенератора є еквівалентні діаметри 0,003-0,008 м. У каналі перетином 0,003 м розташування термопар у його порожнині суттєво вплине на аеродинамічні і теплові процеси. Виникає необхідність розроблення методу експериментального дослідження таких каналів без розташування термопар всередині них.

У третьому розділі представлено методику експериментального визначення коефіцієнта тепловіддачі в каналах реверсивного регенератора. Проведено експериментальне дослідження теплообміну в тонких трубках діаметром 0,003 та 0,008 м. Прямими вимірюваннями визначалися об'єм повітря, напруга та струм на трубці, електрорушійна сила на термопарах, час експериментальних досліджень та температура повітря на вході у дослідну трубку, тоді як непрямыми вимірюваннями – витрата повітря, підведена теплота та температура стінок трубки й повітря в ній.

Відтворити стандартний план експерименту не вдалося, оскільки точне відтворення заздалегідь заданих значень критеріїв Рейнольдса і Грасгофа можливо тільки за наявності високоточної автоматики, що вимагає значних

вкладень коштів. Для уникнення цих проблем, було збільшено кількість експериментів та використано метод найменших квадратів для розрахунку критеріїв Грасгофа та Рейнольдса за експериментальними даними.

Для їх оброблення було застосовано функцію Smart_Round з авторської бібліотеки Decimal.sci версія 1.0 для SciLab 2024.1.0, яка визначає коефіцієнти регресії за методом найменших квадратів. У результаті регресійного аналізу отримано авторську формулу критерію Нуссельта для тонких каналів еквівалентним діаметром 0,003-0,008 м, що застосовується при числах Рейнольдса в діапазоні від 150 до 310, числах Грасгофа від 110 до 1000, а також при відношенні геометричних розмірів каналу x/d у межах від 20 до 200.

У четвертому розділі уточнено математичну модель теплообмінних процесів у реверсивному регенеративному теплоутилізаторі з урахуванням отриманої апроксимаційної експериментальної залежності коефіцієнта тепловіддачі конвекцією в каналах реверсивного регенератора. На основі данної моделі створено авторську програму у SciLab 2024.1.0, яка дозволяє визначати температурну ефективність роботи реверсивних регенераторів із різними теплофізичними характеристиками, яка може бути використана для оптимізації їх конструктивних рішень. Визначено раціональні характеристики реверсивного регенератора реверсивного децентралізованого вентиляційного пристрою, а саме тривалість режимів «приплив» та «видалення» по 70 с; діаметри каналів 0,003-0,004 м; довжина 0,15-0,25 м; сумарна площа живого перерізу всіх каналів 70 % і більше площі вхідного каналу пристрою; швидкість руху повітря у межах від 0,5 до 1,0 м/с, (верхня межа діапазону швидкостей передбачає більшу довжину каналів); для керамічного регенератора коефіцієнт температуропровідності має бути приблизно $4 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$, а питома теплоємність - 880 кДж/(кг·К). При цьому при збільшенні швидкості до верхньої межі необхідно нарощувати довжину реверсивного регенератора. За результатами моделювання процесів теплообміну у реверсивному регенеративному теплоутилізаторі із раціональними характеристиками отримано ефективність утилізації теплоти

втяжного повітря 96-99,6 % (при температурах зовнішнього повітря 253,15 K та внутрішнього повітря 293,15 K). Отримані результати відрізняються від результатів моделювання методами обчислювальної гідродинаміки в межах 2%, що додатково підтверджує достовірність авторської формули числа Нуссельта і дозволяє рекомендувати її для вирішення задач теплообміну в регенеративних пристроях у даних діапазонах розмірів каналів.

У н'ятому розділі проведено техніко-економічний аналіз ефективності використання вдосконаленої конструкції реверсивного регенеративного теплоутилізатора децентралізованого вентиляційного пристрою з урахуванням визначеного значення температурного коефіцієнту ефективності на основі авторської формули числа Нуссельта та створеної програми у програмному комплексі SciLab 2024.1.0. Аналіз енергоспоживання 10-поверхового житлового будинку на 40 квартир зроблено на основі сформованих у програмному забезпеченні Audytor OZC 7.0 Pro трьох енергетичних сертифікатів будівель. Перший сертифікат будівлі із природною вентиляцією; другий – із механічною вентиляцією реверсивними регенеративними децентралізованими пристроями із великими комірками теплоутилізатора; третій – механічною вентиляцією запропонованими удосконаленими реверсивними регенеративними децентралізованими пристроями з тонкими каналами теплоутилізатора.

У результаті проведених розрахунків отримано зниження сумарних тепловтрат будівлі на 30 % та енергоспоживання на 35%, а також підвищення екологічної ефективності (біосферосумісності) за рахунок зменшення викидів вуглекислого газу на 35%. Строк окупності запропонованого рішення становить близько 8,5 років, однак, це значення отримано без урахування заощадження коштів на лікування наслідків синдрому хворого будинку при недостатній вентиляції, тобто за відсутності даних пристроїв.

Ключові слова: енергоефективність, теплоутилізатор, акумулятор теплоти, реверсивний регенератор теплоти, математична модель, теплотехнічні характеристики, децентралізована система вентиляції,

вентиляція житлових приміщень, регенеративний пристрій, коефіцієнт тепловіддачі.

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

а) статті у закордонних виданнях, проіндексованих у базах даних Web of Science Core Collection та/або Scopus:

1. **Vakulenko D.** and Mileikovskiy V. The Experimental Determination of the Heat Transfer Coefficient in Thin Channels of a Regenerative Heat Exchanger, *FME Transactions*, Vol. 53, pp. 173-183, 2025. (SCOPUS / WEB OF SCIENCE, Q2) <https://doi.org/10.5937/fme2501173V>

б) статті у закордонних виданнях інших держав, які входять до Організації економічного співробітництва та розвитку та/або Європейського Союзу:

2. Mileikovskiy V. and **Vakulenko D.** Simulation of the efficiency of improved regenerative decentralised ventilators Vents TwinFresh. *Construction of Optimized Energy Potential (CoOEP)*, Vol. 9, No. 1/2020, pp. 61-67, 2020. <https://doi.org/10.17512/bozpe.2020.1.07>

в) статті у наукових виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України категорії «Б» :

3. **Вакуленко Д.** та Мілейковський В. Моделювання ефективності теплоутилізації регенеративного пристрою за різними підходами. *Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання*, т. 41, Квітень 2022, с. 32-38, 2022. <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2022.41.32-38>
4. **Вакуленко Д.** Теоретичні дослідження доцільного діаметра ізоляції тонкої трубки. *Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання*, т. 46, Лютий 2024, с. 5-17, 2024. <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2023.46.5-17>

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

5. **Vakulenko D.**, Mileikovskiy V., Tkachenko T., and Liubarets O.: Investigation in critical radius of thermal insulation for vertical pipes, *Contents of Proceedings of 23rd International Scientific Conference Engineering for Rural Development*, 24-26 May 2023, pp. 232-238, 2024. (SCOPUS) <https://doi.org/10.22616/ERDev.2024.23.TF047>
6. **Vakulenko D.**, Mileikovskiy V., Tkachenko, T., Ujma, A. and Konovaliuk,

- V.: Analysis of critical radius of insulation for horizontal pipes, *Contents of Proceedings of 22nd International Scientific Conference Engineering for Rural Development*, 22-24 May 2024, pp. 902-907, 2023. (SCOPUS) <https://doi.org/10.22616/ERDev.2023.22.TF178>
7. **Вакуленко Д.** Наближене моделювання теплообміну в регенераторах вентиляційних пристроїв. *III міжнародна науково-технічна конференція "Ефективні технології у будівництві"*, Київ, 28-29 березня 2018 р., с. 154-155.
 8. **Vakulenko D.** and Mileikovskiy V. Approximate Modeling of Heat Exchange in the Regenerator of Ventilators. *Восьма міжнародна науково-практична конференція "Енергоінтеграція-2018"*, Київ, 25-27 квітня 2018 р., с. 24.
 9. **Вакуленко Д. І.** та Мілейковський В. О. Моделювання процесів теплообміну в регенеративних теплоутилізаторах на прикладі установки «ТвінФреш». *International Scientific-Practical Conference of Young Scientists "Build-Master-Class-2018"*, Київ, 2018, с. 290-291.
 10. **Вакуленко Д. І.** Уточнення математичної моделі тепломасообмінних процесів у регенераторі пристрою «Twin Fresh». *Тези доповідей міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених «БУД-МАЙСТЕР-КЛАС-2020»*, 25-27 листопада 2020 р., Київ, КНУБА, 2020, с. 204-205. URL: https://www.bmc-conf.com/download/bmc-2020_articles.pdf
 11. Мілейковський В. О. та **Вакуленко Д. І.** Ефективність утилізації теплоти у децентралізованих регенеративних установках. *Актуальні проблеми, пріоритетні напрямки та стратегії розвитку України: тези доповідей IV Міжнародної науково-практичної онлайн-конференції*, 10 лютого 2022 р., Київ, ред. О. С. Волошкіна та ін., ІТТА, 2022, с. 162. URL: https://itta.org.ua/wp-content/uploads/2022/02/mizhnarodna_asocziacziya_transferu_tehnologij-3.pdf#page=162

12. **Вакуленко Д. І.** та Мілейковський В. О. Вплив тиску всередині та ззовні будівлі на роботу децентралізованих систем вентиляції. *Енергоощадні машини і технології, Матеріали III Міжнар. наук.-практ. конф.*, 17-19 травня 2022 р., Київ, КНУБА, 2022, с. 133-135. URL: https://library.knuba.edu.ua/books/zbirniki/27/ESMT_Conference_Proceedings_2022_PDF.pdf
13. **Вакуленко Д. І.** та Мілейковський В. О. Вплив зовнішніх чинників на роботу регенеративних децентралізованих вентиляційних установок. *Актуальні проблеми науки, освіти та суспільства: теорія і практика: збірник тез доповідей міжнародної науково-практичної конференції*, 16 червня 2022 р., Полтава, ЦФЕНД, 2022, с. 47-48. URL: <http://www.economics.in.ua/2022/07/blog-post.html>
14. Мілейковський В. та **Вакуленко Д.** Дослідження теплообмінних процесів у тонких каналах регенеративного пристрою. *III Міжнародна науково-практична конференція «Екологія, ресурси, енергія»*, 23-25 листопада 2022 р., Київ, 2022, с. 61-62. URL: http://www.ere.org.ua/data/Програма_і_тези_2022.pdf
15. **Vakulenko D.** and Mileikovskiy V. Determination of the Appropriate Thickness of Insulation of Horizontal Cylindrical Surfaces in the Study of Heat Transfer. *VII International Scientific and Practical Conference “Challenges and Problems of Modern Science”*, 15-16 June 2023, London, United Kingdom, pp. 39-46. URL: <https://conference-w.com/wp-content/uploads/2023/06/GB.L-1516062023.pdf>
16. **Вакуленко Д.** та Мілейковський В. Дослідження регенеративного теплоутилізатора, що працює з періодичною зміною напрямку потоку повітря. *Матеріали II Міжнародної науково-практичної конференції «Green Construction»*, 13-14 квітня 2023 р., с. 414-417. URL: https://library.knuba.edu.ua/books/zbirniki/30/greenconst_2_23.pdf
17. **Вакуленко Д.** та Мілейковський В. Дослідження товщини теплової ізоляції горизонтальних циліндрів. *IV Міжнародна науково-практична*

конференція «Екологія, ресурси, енергія»: матеріали конференції, 22-24 листопада 2023 р., Київ, КНУБА, 2023, с. 86-87. URL: https://drive.google.com/file/d/1F3jn_ypNLqHuzm0EqOFMI1QWelEw64AX/view

18. **Вакуленко Д. І.** та Мілейковський В. О. Дослідження опору теплопередачі теплоізоляції вертикальних енергоефективних циліндричних будівель. *Матеріали III М Міжнародної науково-практичної конференції «Green Construction»*, 16-17 квітня 2024 р., Київ, Київський національний університет будівництва і архітектури, 2024, с. 418-422. URL: https://www.knuba.edu.ua/wp-content/uploads/2024/05/zbirnyk_gotovyj-4.pdf
19. **Вакуленко Д.** та Мілейковський В. Дослідження теплообміну в системах вентиляції: нові підходи до зменшення тепловтрат. *Матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції «Прикладні науково-технічні дослідження»*, 14-16 травня 2024 р., Івано-Франківськ, Видавець Кушнір Г. М., 2024, с. 168-170. URL: <https://ukrtsa.org.ua/wp-content/uploads/2024/05/conf2024.pdf>
20. **Vakulenko D.** and Mileikovskiy V. Experimental Study of Heat Transfer Processes in a Regenerative Ventilation Unit. *XVIII International Scientific Conference: «Development of science in the XXI century». Abstracts*, 26-27 December 2024, Dortmund, Germany, 2024, pp. 1156-1158. URL: <https://conference-w.com/wp-content/uploads/2025/01/Ger.D-2627122024.pdf>

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

21. Tkachenko T., Bystrov D., **Vakulenko D.**, et al.: Creating perspective technologies of forming the safe building environment combining "green structures", phytodesign, and engineering systems, Scientific report. Reg. No. 0224U001505. Kyiv, 2024.
22. Mileikovskiy V. and **Vakulenko D.** Analytical Studies of the Non-stationary

Mode of Operation of the VENTS TwinFresh Ventilator Heat Regenerator.
VENTS Magazine, Kyiv, 2019.