

В І Д Г У К

офіційної опонентки

кандидатки технічних наук, доцентки кафедри теплотехніки та енергозбереження Національного технічного університету України
"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

СУХОДУБ ІРИНИ ОЛЕГІВНИ

на дисертаційну роботу Вакуленко Дар'ї Ігорівни
«РЕГЕНЕРАТИВНІ РЕВЕРСИВНІ ПРИСТРОЇ ДЛЯ
ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОЇ ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНОЇ ВЕНТИЛЯЦІЇ
ПРИМІЩЕНЬ»,

подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії
в галузі знань 19 «Архітектура та будівництво»,
за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія»

1. Актуальність обраної теми

Питання раціонального використання енергоресурсів у сучасному будівництві набуває особливої ваги в умовах зростання вимог до зниження енергоспоживання та підвищення рівня екологічної безпеки. Традиційні вентиляційні системи, які не забезпечують повторне використання теплоти витяжного повітря, залишаються джерелом значних тепловтрат, що призводить до підвищених експлуатаційних витрат на утримання будівель.

Ця проблема є особливо актуальною для будівель з обмеженим бюджетом, де через високу вартість централізованих вентиляційних систем часто застосовуються природна вентиляція або звичайне провітрювання без утилізації теплоти витяжного повітря. Як наслідок, зростають витрати на опалення та кондиціонування повітря, при цьому погіршується якість повітряного середовища у приміщеннях. Це спричиняє накопичення шкідливих летких органічних сполук (ЛОС), продуктів з матеріалів оздоблення, вуглекислого газу, а також сприяє розвитку патогенної мікрофлори, що в сукупності може викликати синдром хворого будинку.

Доцільним технічним рішенням у цьому контексті є застосування децентралізованих реверсивних вентиляційних пристроїв з регенерацією теплоти, які дають змогу суттєво знизити втрати енергії на опалення та охолодження, підвищуючи тим самим загальну енергоефективність будівлі. Ефективність функціонування таких пристроїв значною мірою визначається теплофізичними властивостями матеріалів регенератора, геометрією каналів, параметрами повітрообміну та особливостями кліматичних умов експлуатації таким систем.

Незважаючи на очевидні переваги такого підходу, наразі бракує комплексних наукових досліджень, які б системно оцінювали вплив зазначених факторів на процеси тепломасообміну в реверсивних регенеративних вентиляторах. Відсутність розвинених методів математичного моделювання та точних експериментальних методик обмежує можливості подальшої оптимізації конструкцій і їх адаптації до різних умов експлуатації.

Таким чином, актуальним науково-технічним завданням є підвищення ефективності процесів регенерування енергії на опалення та охолодження в системах децентралізованої вентиляції будівель різного призначення.

2. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій.

Для реалізації поставлених дослідницьких завдань у дисертації Дар'ї Вакуленко було застосовано інтегрований підхід, що поєднує чисельне моделювання з експериментальними дослідженнями. Зокрема, було побудовано математичну модель, яка описує нестационарні теплообмінні процеси в реверсивному регенеративному теплообміннику. Модель базується на використанні рівнянь енергетичного балансу та диференціального рівняння теплопровідності в формулюванні Фур'є–Кірхгофа.

Розрахунок температурних і гідродинамічних характеристик здійснювався з використанням методів обчислювальної гідродинаміки (CFD). Для опису режимів ламінарного повітряного потоку було використано

рівняння Нав'є–Стокса, а аналіз теплових потоків в середовищі регенератора проводився на основі рівнянь теплопровідності.

Експериментальна частина дослідження була організована з дотриманням принципів сучасної вимірюваної бази та методів планування експерименту. Для зменшення похибок і підвищення достовірності результатів застосовувалося спеціалізоване вимірювальне обладнання, а також статистична обробка отриманих даних.

Результати дослідження були порівняні з даними, представленими в наукових джерелах, що дозволило верифікувати розроблену емпіричну залежність для визначення числа Нуссельта. Цю формулу було закладено у математичну модель нестационарної роботи реверсивного регенеративного утилізатора теплоти витяжного повітря задля визначення температурного коефіцієнта утилізації теплоти. На основі цього методу створено програмне забезпечення, яке може бути використане для оптимізації конструктивних параметрів регенеративних вентиляційних пристроїв.

3. Наукова новизна одержаних результатів

Уперше:

- Сформульовано аналітичну залежність числа Нуссельта від числа Грасгофа, еквівалентного діаметра та координати x для процесу тепловіддачі в тонкостінних трубках діаметром 0,003–0,008 м, що дає змогу розраховувати температурний коефіцієнт ефективності утилізації теплоти витяжного повітря в реверсивному регенеративному теплообміннику децентралізованих вентиляційних систем..

Удосконалено:

- математичну модель нестационарних процесів тепломасообміну в регенеративному теплообміннику систем вентиляції з реверсивною дією, що дало змогу оцінити вплив його теплофізичних характеристик на інтенсивність теплопередачі та ефективність регенерування теплової енергії;
- уявлення щодо оптимальної товщини теплової ізоляції;
- методику експериментального визначення локальних коефіцієнтів те-

пловіддачі від внутрішньої поверхні стінки до повітря в тонкостінних трубках за відсутності можливості розміщення датчиків усередині їх порожнини.

Набула подальшого розвитку:

- методика експериментального визначення локальних коефіцієнтів тепловіддачі при ламінарному русі повітря в тонкостінних трубках діаметром 0,003–0,008 м, що дозволило уточнити математичну модель нестационарного тепломасообміну в теплообмінниках реверсивного типу.

Практичне значення роботи:

- удосконалено конструктивні рішення реверсивного регенеративного теплоутилізатора для децентралізованих вентиляційних систем, що сприяло підвищенню ефективності регенерування теплової енергії;
- запропоновано та обґрунтовано рекомендації щодо встановлення розроблених вентиляційних пристроїв, що забезпечують енергоефективну вентиляцію приміщень із утилізацією теплоти та холоду без суттєвого порушення архітектурно-дизайнерських особливостей приміщень;
- розроблено алгоритм і відповідну програму для моделювання ефективності роботи реверсивного регенератора теплоти, що дає змогу оцінити вплив теплофізичних параметрів конструкції на ефективність утилізації теплоти витяжного повітря.

4. Загальнонаціональне та світове значення роботи.

З огляду на постійне зростання цін на енергоносії та посилення глобальних кліматичних викликів, проектування та впровадження енергоефективних вентиляційних рішень набуває ключового значення як для України, що прагне зменшення енергетичної залежності, так і для міжнародної спільноти. Реверсивні регенеративні вентиляційні пристрої дозволяють суттєво знизити споживання енергії, необхідної для опалення та охолодження повітря в будівлях. З урахуванням Цілі 13 сталого розвитку, досягнення високої енергоефективності у будівельному секторі визначається як пріоритетне завдання. У цьому контексті впровадження сучасних вентиляційних технологій, що відповідають міжнародним стандартам, є

вагомим кроком у напрямку реалізації глобальних кліматичних цілей.

В умовах, коли значна частина фонду житлових та громадських будівель України характеризується низьким рівнем енергоефективності, а соціально-економічна ситуація ускладнена наслідками війни, децентралізовані реверсивні вентиляційні системи можуть стати оптимальним рішенням для модернізації наявних будівель, зокрема в сегменті доступного житла. Крім того, розвиток та серійне виробництво таких пристроїв в Україні може стати поштовхом для зростання національного науково-технічного потенціалу та створення конкурентоспроможних продуктів на глобальному ринку. Отже, дане дослідження має високу актуальність як на загальнонаціональному, так і на світовому рівні.

5. Повнота викладення здобувачем основних результатів у наукових публікаціях.

Результати дисертаційних досліджень опубліковано у 22 друкованих роботах, серед яких одна стаття в науковому журналі, що індексується наукометричною базою SCOPUS з квантилем Q2, одна стаття в закордонному виданні держави, яка входить до ОЕСР та ЄС, дві статті в наукових фахових виданнях категорії «Б» (одноосібні або у співавторстві з науковим керівником), дві доповіді в збірниках матеріалів конференцій з індексацією в наукометричній базі SCOPUS, 15 тез доповідей у матеріалах міжнародних конференцій та дві роботи, які додатково відображають наукові результати дисертації.

6. Відсутність академічного плагіату, фабрикації, фальсифікації

У межах проведеного дослідження не зафіксовано порушень принципів академічної доброчесності, зокрема відсутні ознаки академічного плагіату, фальсифікації чи фабрикації даних.

7. Оцінка мови, стилю та оформлення дисертації.

Дисертаційну роботу виконано з дотриманням норм сучасної

української мови, із застосуванням загальноприйнятої наукової термінології. Виклад матеріалу – зокрема теоретичних положень, результатів експериментальних досліджень, висновків і практичних рекомендацій – відзначається логічністю та доступністю для сприйняття. Оформлення дисертації відповідає чинним вимогам Міністерства освіти і науки України.

8. Аналіз основного змісту роботи.

У вступі обгрунтовано актуальність досліджуваної тематики, сформульовано мету й завдання роботи, окреслено наукову новизну та практичне значення одержаних результатів, а також відображено особистий внесок авторки. Надано інформацію щодо апробації дослідження та публікацій, які підтверджують вагомість здобутих результатів.

Перший розділ містить огляд сучасних підходів до підвищення енергоефективності децентралізованих реверсивних вентиляційних систем із регенерацією теплоти витяжного повітря, що забезпечують підтримання комфортного мікроклімату у приміщеннях. На підставі аналізу були визначені основні напрями підвищення ефективності утилізації теплоти, зокрема через удосконалення конструктивних елементів.

У другому розділі розглянуто теоретичну модель нестационарних теплових процесів у реверсивному регенераторі вентиляційних систем. Температурні коефіцієнти ефективності обчислювалися трьома методами. Перший базується на застосуванні формули Міхеєва для ламінарного потоку у вузьких каналах з урахуванням рівнянь Фур'є–Кірхгофа та теплового балансу. Другий враховує критерій Грасгофа для визначення коефіцієнта тепловіддачі. Третій метод реалізовано шляхом CFD-моделювання на основі рівнянь конвекції-дифузії та Нав'є–Стокса. Результати чисельних розрахунків дали значення ефективності 58,5%, 33,1% та 97,4% відповідно, з максимальною розбіжністю до 194,26%, що свідчить про потребу в уточненні коефіцієнтів тепловіддачі для каналів малого діаметра (0,003–0,008 м). Оскільки встановлення термопар у каналах з діаметром 0,003 м змінює характеристики потоку, було розроблено експериментальну методику

з розміщенням термопар на зовнішній поверхні теплоізованих тонкостінних трубок. Це стало можливим завдяки уточненню положення про критичний діаметр теплоізоляції як глобальний максимум опору теплопередачі.

У третьому розділі наведено експериментальну методику та результати визначення коефіцієнта тепловіддачі в тонких каналах реверсивного теплоутилізатора. На основі регресійного аналізу отримано емпіричну авторську формулу критерію Нуссельта, що застосовується для каналів з еквівалентним діаметром від 0,003 до 0,008 м за значень числа Рейнольдса від 150 до 310, числа Грасгофа від 110 до 1000, та відношення довжини каналу до діаметра x/d у межах від 20 до 200.

Четвертий розділ присвячено удосконаленню математичної моделі теплообміну в реверсивному теплоутилізаторі з урахуванням встановленої експериментально залежності коефіцієнта тепловіддачі. Модель реалізовано у вигляді програмного модуля в середовищі SciLab 2024.1.0, що дозволяє розраховувати температурний коефіцієнт ефективності для регенераторів із різними теплофізичними параметрами. Застосування моделі для конструкцій з оптимізованими характеристиками дало змогу досягти ефективності утилізації теплоти на рівні 96–99,6%. Похибка порівняно з результатами CFD-моделювання не перевищила 2%.

У п'ятому розділі виконано аналіз техніко-економічної доцільності впровадження модернізованого реверсивного регенеративного теплоутилізатора в системах децентралізованої вентиляції. На основі авторської залежності критерію Нуссельта та використання програмного забезпечення SciLab 2024.1.0 було визначено, що впровадження запропонованого рішення дозволяє скоротити сумарні тепловтрати будівлі на 30%, знизити енергоспоживання на 35% та зменшити викиди CO₂ також на 35%. Орієнтовний строк окупності становить близько 8,5 років без врахування додаткової економії, пов'язаної зі зменшенням захворюваності, спричиненої неякісною вентиляцією.

9. Зауваження та дискусійні питання

1. У роботі не розглянуто вологісний режим регенератора, зокрема не проаналізовано можливості конденсації вологи та намерзання льоду / утворення інею.
2. При оптимізації конструкції регенеративного теплообмінного апарату доцільно було би врахувати не тільки зростання температурного коефіцієнту ефективності, а і можливе збільшення перепаду тиску.
3. У даній роботі доцільно було би розширити аналіз ефективності регенеративного теплообмінного апарату з використанням ексергетичного аналізу.
4. У другому розділі доцільно було би навести деталі щодо проведеного CFD моделювання регенеративного теплообмінного апарату стандартної та покращеної конфігурації.
5. В п'ятому розділі не наведено вихідні величини для розрахунку розподілу втрат теплоти через оболонку та інфільтрацію/вентиляцію та енергоспоживання на опалення, охолодження та вентиляції, а також не враховано зміна втрати тиску на енергоспоживання на вентилятори для теплообмінника покращеної конфігурації.
6. У дисертації не порівняно техніко-економічні показники даного пристрою з припливно-витяжними установками з рекуперативними теплообмінниками, які також можна розміщувати у багатоквартирних житлових будівлях.

Зазначені зауваження не є суттєвими і не змінюють загальної позитивної оцінки дисертаційної роботи.

ВИСНОВОК

Дисертаційна робота Вакуленко Дар'ї Ігорівни «Регенеративні реверсивні пристрої для енергоефективної децентралізованої вентиляції приміщень» є завершеним науковим дослідженням, у якому отримано нові результати, що мають наукову новизну та практичну цінність. Зміст роботи

відповідає вимогам освітньо-наукової програми підготовки докторів філософії за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія» галузі знань 19 «Архітектура та будівництво», а також чинним нормативним документам, зокрема вимогам, визначеним наказом Міністерства освіти і науки України від 12.01.2017 № 40 (із внесеними змінами згідно з наказом від 31.05.2019 № 759), і положенням пунктів 5–9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 12.01.2022 № 44. Ураховуючи рівень виконаного дослідження, Вакулєнко Дар'я Ігорівна заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія» галузі знань 19 «Архітектура та будівництво».

Офіційна опонентка,
кандидатка технічних наук, доцентка,
доцентка кафедри теплотехніки та
енергозбереження, Національного
технічного університету України
"Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського"

Ірина Суходуб

Підпис гр. <u>Ірина СУХОДУБ</u>	
ЗАСВІДЧУЮ	
Відділ кадрів	
<i>[підпис]</i>	<i>[підпис]</i>
підпис	пр-ще

« 04 » 06 2025 року

