

# **ВІДГУК**

офіційного опонента

кандидата технічних наук, доцента, завідувача кафедри інженерії  
енергосистем

Національного університету біоресурсів і природокористування України

**АНТИПОВА ЄВГЕНА ОЛЕКСІЙОВИЧА**

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.**

Проблема ефективного використання енергії в сучасних будівлях набуває особливої актуальності через необхідність зменшення енергоспоживання та підвищення екологічної безпеки. Однак традиційні вентиляційні системи без утилізації теплоти витяжного повітря залишаються джерелом суттєвих теплових втрат і спричиняють збільшення експлуатаційних витрат.

Це питання є особливо важливим для будівель економ-класу, де централізовані системи вентиляції через свою високу вартість практично не використовуються. Застосування природної вентиляції або простого провітрювання не передбачає повернення теплової енергії, що зумовлює підвищення витрат на опалення та кондиціонування повітря. Одночасно погіршується якість повітря в приміщеннях, розвивається патогенна мікрофлора, накопичуються шкідливі леткі органічні сполуки від меблів, оздоблення та обладнання, а також вуглекислий газ, що призводить до виникнення синдрому «хворого будинку».

Розв'язанням цієї проблеми є впровадження реверсивних регенеративних вентиляційних пристроїв, які дозволяють значно зменшити втрати теплоти, тобто підвищити загальну енергоефективність будівель. Основні фактори, що впливають на ефективність таких пристроїв: теплофізичні характеристики матеріалу регенератора, конструкція каналів, режими повітрообміну та специфіка кліматичних умов експлуатації.

Незважаючи на перспективність цього підходу, сьогодні відсутні достатньо повні дослідження, які б комплексно розглядали вплив ключових параметрів на процеси теплопередачі в таких пристроях. Недостатній рівень розвитку методик математичного моделювання та експериментального оцінювання їхніх теплотехнічних характеристик ускладнює вдосконалення конструкцій та обмежує можливості адаптації їх до різноманітних умов використання.

Отже, актуальним завданням є підвищення ефективності утилізації теплоти при децентралізованій вентиляції приміщень житлових і громадських будівель невеликої поверховості.

## **2. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій.**

Для досягнення поставлених цілей застосовано поєднання математичного моделювання та експериментальних досліджень. Зокрема, була розроблена математична модель, що описує динаміку тепломасообмінних процесів у реверсивному регенераторі, ґрунтуючись на рівняннях теплового балансу та рівнянні Фур'є–Кірхгофа.

Моделювання теплових і аеродинамічних характеристик у регенеративному теплообміннику здійснювалося методами обчислювальної гідродинаміки (CFD), де використовувалися рівняння Нав'є–Стокса для опису ламінарного потоку та рівняння Фур'є–Кірхгофа для аналізу теплопровідності в матеріалах.

Експериментальна частина дослідження базувалася на сучасних

підходах до планування експериментів і аналізу результатів. Було використано спеціалізоване обладнання та статистичні методи для забезпечення точності вимірювань і достовірності отриманих даних.

Отримані результати були зіставлені з відомими літературними даними. Це підтвердило адекватність створеної апроксимаційної формули для визначення числа Нуссельта та розробленого авторського методу, що дозволяє визначати температурний коефіцієнт ефективності утилізації теплоти в реверсивних регенераторах з урахуванням різних теплофізичних характеристик. Написана програма за цим методом може бути використана для оптимізації конструктивних параметрів цих пристроїв.

### **3. Наукова новизна одержаних результатів.**

*Уперше:*

- отримано аналітичну залежність числа Нуссельта від числа Грасгофа, еквівалентного діаметра та координати  $x$  для тепловіддачі в тонких трубках діаметрами 0,003 – 0,008 м, яка дозволяє визначити температурний коефіцієнт ефективності утилізації теплоти витяжного повітря в реверсивному регенеративному теплообміннику децентралізованих вентиляційних пристроїв.

*Удосконалено:*

- математичну модель нестационарних тепломасообмінних процесів у реверсивному регенераторі теплоти реверсивного вентиляційного пристрою, що дозволило оцінити вплив його теплофізичних властивостей на інтенсивність теплопередачі та ефективність регенерування теплової енергії;
- уявлення про доцільну товщину теплової ізоляції;
- методику експериментальних досліджень локальних коефіцієнтів тепловіддачі від поверхні стінки до повітря в тонких трубках без можливості встановлення датчиків у їхніх порожнинах.

*Набула подальшого розвитку:*

- методика експериментального визначення локальних коефіцієнтів тепловіддачі при ламінарній течії в тонких трубках діаметрами 0,003-0,008 м,

що дало змогу уточнити математичну модель нестационарного тепломасообміну в теплообмінних апаратах реверсивного типу.

*Практичне значення роботи:*

- удосконалено конструктивні рішення реверсивного регенеративного теплоутилізатора децентралізованих вентиляційних пристроїв;
- запропоновано та обґрунтовано рекомендації щодо встановлення пропонованих пристроїв, що дозволить забезпечити енергоефективну вентиляцію приміщень з утилізацією теплоти з мінімальним втручанням в інтер'єри приміщень;
- створено алгоритм і програму для моделювання ефективності роботи реверсивного регенератора теплоти, що дозволяє оцінити вплив різних теплофізичних характеристик реверсивного регенератора на ефективність утилізації теплоти витяжного повітря.

#### **4. Загальнонаціональне та світове значення роботи.**

У контексті зростання вартості енергоносіїв та стрімких глобальних кліматичних змін, розроблення й впровадження енергоефективних вентиляційних систем набувають стратегічного значення як для України, що прагне енергонезалежності, так і для всього світу. Реверсивні регенеративні пристрої здатні значно зменшити енергоспоживання на опалення й кондиціювання повітря будівель. Враховуючи, що Ціль 13 Сталого розвитку визначає енергоефективність будівель пріоритетною, впровадження технологій, що відповідають світовим стандартам у галузі вентиляції, є важливим кроком для досягнення цієї Цілі.

Оскільки, з одного боку, значна частина житлового фонду в Україні є енергонеефективною, а з іншого – війна призвела до погіршення фінансового стану населення, подекуди навіть зубожіння, впровадження децентралізованих реверсивних систем вентиляції може стати ефективним шляхом модернізації старих будівель, особливо економ-класу. Крім того, розроблення та виробництво реверсивних регенеративних пристроїв може

сприяти розвитку вітчизняних науково-технічних інновацій, що будуть конкурентоспроможними на світовому ринку. Отже, дане дослідження має велике значення як для національного, так і для глобального контексту.

#### **5. Повнота викладення здобувачем основних результатів у наукових публікаціях.**

Результати дисертаційного дослідження 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 роботі не виявлено ознак академічної недоброчесності, а саме академічного плагіату, фальсифікації або фабрикації результатів. Використані ідеї, результати і тексти інших авторів мають належні посилання на відповідне джерело, а сама дисертаційна робота здобувачки є оригінальною працею та не порушує принципів академічної доброчесності.

#### **7. Оцінка мови, стилю та оформлення дисертації.**

Дисертація написана коректною українською мовою з дотриманням логічного порядку викладу матеріалу. Застосована в роботі наукова термінологія є загальновизнаною, стиль висвітлення результатів теоретичних та експериментальних досліджень, наукових положень, висновків і рекомендацій робить їх легко сприйнятними для читача. Оформлення роботи відповідає вимогам, установленим Міністерством освіти і науки України.

## 8. Аналіз основного змісту роботи.

У вступі розглянуто важливість досліджуваної проблеми, чітко визначено мету та завдання дослідження, подано інформацію про наукову новизну та практичну цінність роботи, а також особистий внесок авторки. Зазначено апробацію проведених досліджень і публікації, що підтверджують важливість результатів.

Перший розділ присвячено аналізу сучасних методів підвищення енергоефективності в децентралізованих реверсивних регенеративних вентиляційних системах, які забезпечують комфортний мікроклімат. Ці системи працюють за циклічним принципом (70 секунд приплив, 70 секунд витяжка), регенеруючи теплоту витяжного повітря. За підсумками дослідження були визначені основні напрямки підвищення ефективності утилізації тепла, зокрема через удосконалення конструкції таких пристроїв.

Другий розділ містить теоретичне дослідження нестационарних теплообмінних процесів у реверсивному регенераторі вентиляційних пристроїв. Визначено температурні коефіцієнти ефективності за трьома методами. Перший метод використовує формулу Міхеєва для ламінарного потоку в тонких каналах, застосовуючи рівняння Фур'є-Кірхгофа та теплового балансу. Другий враховує критерій Грасгофа для розрахунку коефіцієнта тепловіддачі. Третій метод базується на моделюванні тепломасообміну методами обчислювальної гідродинаміки за рівняннями конвекції-дифузії та Нав'є-Стокса. Чисельні експерименти показали різні значення коефіцієнтів ефективності: 58,5%, 33,1% і 97,4%, з розбіжністю до 194,26%, що вказує на необхідність уточнення коефіцієнта тепловіддачі в тонких каналах (діаметр 0,003-0,008 м). Оскільки розміщення термопар у каналах малого діаметра (0,003 м) впливає на потік повітря, була розроблена та обґрунтована методика експериментального дослідження з зовнішнім розміщенням термопар на тонких теплоізованих трубках. Це стало можливим завдяки спростуванню концепції критичного діаметра теплоізоляції як глобального максимуму опору теплопередачі.

У третьому розділі викладена методика та результати експериментального визначення коефіцієнта тепловіддачі в тонких каналах реверсивного регенератора. Регресійний аналіз експериментальних даних дозволив отримати авторську формулу критерію Нуссельта для тонких каналів з еквівалентним діаметром 0,003-0,008 м, яка застосовна при числах Рейнольдса в діапазоні від 150 до 310, числах Грасгофа від 110 до 1000, а також при відношенні геометричних розмірів каналу  $x/d$  від 20 до 200.

Четвертий розділ присвячено уточненню математичної моделі теплообміну в реверсивному регенеративному теплоутилізаторі на основі отриманої експериментальної залежності коефіцієнта тепловіддачі. Ця модель лягла в основу програми в SciLab 2024.1.0, що дозволяє визначити температурний коефіцієнт ефективності регенераторів з різними теплофізичними характеристиками, яку можна використовувати для оптимізації їх конструкції. Моделювання теплообміну в регенераторі дослідної модифікації, проведеного авторкою, показало ефективність утилізації теплоти на рівні 96-99,6%. Різниця з результатами, отриманими методом обчислювальної гідродинаміки, становить лише 2%.

У п'ятому розділі виконано техніко-економічний аналіз ефективності вдосконаленого реверсивного регенеративного теплоутилізатора для децентралізованої вентиляції. Використовуючи температурний коефіцієнт ефективності, визначений на основі авторської формули для числа Нуссельта за допомогою створеної авторкою програми у SciLab 2024.1.0, виявлено зниження сумарних тепловтрат будівлі на 30%, енергоспоживання на 35% та скорочення викидів вуглекислого газу на 35%. Строк окупності запропонованого рішення становить близько 8,5 років без урахування економії на лікуванні наслідків синдрому «хворого будинку», у разі його появи, за умови, якщо вентиляція була б недостатньою.

## 9. Зауваження та дискусійні питання.

Загалом робота складає позитивне враження та, попри це, варто відмітити декілька зауважень:

1. У літературному огляді відсутній висновок стосовно можливостей застосування напрацювань кожного автора для досліджень процесів гідрогазодинаміки та тепломасопереносу в регенеративному реверсивному вентиляційному пристрої.
2. У роботі не вказано, чи отримана авторська формула лишається справедливою і для ширших діапазонів зміни впливових факторів при дослідженні теплоутилізаторів інших конструкцій.
3. У роботі відсутній опис відомих методик дослідження тепловіддачі в теплообмінних трубах. Чому не можна було використати наявні методики?
4. У роботі не враховано вплив зовнішнього та внутрішнього ковпаків, які можуть спричинити появу «застійних зон», на процеси потекорозподілу в каналах реверсивного регенератора теплоти.
5. На сторінці 49 роботи показано, що для моделювання теплообмінних процесів у реверсивному регенеративному теплоутилізаторі, в якості граничних умов, температура зовнішнього повітря прийнята  $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $272,15\text{ K}$ ), як середня для опалювального періоду. Однак, варто було б здійснити моделювання при значно нижчих середніх температурах, які є характерними для січня ( $-4,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) та лютого ( $-3,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) місяців, і дослідити можливу появу зон конденсації вологи в об'ємі керамічного реверсивного регенератора теплоти.
6. На с. 101 роботи, для підтвердження пояснення від'ємного степеня при числі Грасгофа, доцільно було б навести візуалізацію течії в трубці.

7. У роботі не проаналізовано наскільки зросте споживана потужність та шум від роботи вентилятора реверсивного регенератора пропонованої конструкції та як це вплине на економічну ефективність експлуатації розробки?
8. У розділі 5, наведено результати моделювання та показано, що впровадження реверсивних регенеративних децентралізованих вентиляційних пристроїв дозволяє зменшити тепловтрати на підігрів припливного зовнішнього повітря від 11,1 % до 29,9 % залежно від типу пристрою (таблиця 5.1). Однак, авторкою не зазначено для якого рівня теплового захисту зовнішніх огорожувальних конструкцій будівлі справедливі отримані результати.
9. У тексті роботи наявні деякі неточності та друкарські помилки, зокрема:
  - на стор. 19, у першому реченні абзацу 1, наявний розділовий знак у вигляді крапки, що порушує логічність побудови речення, після слова «стійкості» має бути знак «,», а не «.»;
  - на стор. 43 зазначено, що керамічний реверсивний регенератор теплоти складається з 16 отворів прямокутної форми, восьми отворів циліндричної форми та восьми трикутної форми, однак розріз регенератора, наведений на рис. 2.1, вказує на наявність восьми отворів, які мають не циліндричну, а форму прямокутної трапеції;
  - на стор. 72, у першому реченні абзацу 3, наведено послідовне подвоєння слів «струм струм».

Наведені зауваження не носять принципового характеру, не є критичними і не змінюють загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи, не зменшують її вагомому внеску у новизну отриманих наукових результатів.

## ВИСНОВОК

Дисертаційна робота Вакуленко Дар'ї Ігорівни «Регенеративні реверсивні пристрої для енергоефективної децентралізованої вентиляції приміщень» містить самостійно отримані нові наукові результати, є завершеною науковою працею, відповідає вимогам, що ставляться в освітньо-науковій програмі «Будівництво та цивільна інженерія» третього рівня вищої освіти за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія», а також вимогам Міністерства освіти і науки України до дисертацій на здобуття кваліфікаційного рівня докторів філософії (наказ Міністерства освіти і науки України від 12 січня 2017 р. №40 зі зміною від 31 травня 2019 р. №759) та пп. 5-9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» (постанова Кабінету Міністрів України від 12.01.2022 р. № 44), а її авторка – Вакуленко Дар'я Ігорівна, заслуговує присудження їй наукового ступеня доктора філософії в галузі знань 19 «Архітектура та будівництво» за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія».

Офіційний опонент,

кандидат технічних наук, доцент,

завідувач кафедри інженерії енергосистем

Національного університету біоресурсів і

природокористування України

Євген АНТИПОВ

Підпис доцента

Євгена Антипова

ЗАСВІДЧУЮ

Начальник відділу кадрів

Національного університету біоресурсів і

природокористування України



Сергій ГРИЩЕНКО